

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**DESARROLLO SOSTENIBLE DE USOS DE SUELO EN CIUDADES EN CRECIMIENTO,  
APLICANDO HIDROGEOLOGÍA URBANA COMO PARÁMETRO DE  
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: CASO DE ESTUDIO LINARES, N. L., MÉXICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN GEOCIENCIAS**

PRESENTA

**RENÉ ALBERTO DÁVILA PÓRCEL**

LINARES, N. L.

ENERO, 2011



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**“DESARROLLO SOSTENIBLE DE USOS DE SUELO EN CIUDADES EN CRECIMIENTO,  
APLICANDO HIDROGEOLOGÍA URBANA COMO PARÁMETRO DE  
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: CASO DE ESTUDIO LINARES, N. L., MÉXICO”**

PRESENTA

**M. C. RENÉ ALBERTO DÁVILA PÓRCEL**

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN GEOCIENCIAS**

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TESIS

---

**Dr. rer. nat. Héctor De León Gómez**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**“DESARROLLO SOSTENIBLE DE USOS DE SUELO EN CIUDADES EN CRECIMIENTO,  
APLICANDO HIDROGEOLOGÍA URBANA COMO PARÁMETRO DE  
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: CASO DE ESTUDIO LINARES, N. L., MÉXICO”**

PRESENTA

**M.C. RENÉ ALBERTO DÁVILA PÓRCEL**

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN GEOCIENCIAS**

**Vo. Bo.  
COMITÉ DE REVISIÓN**

---

**Dr. Héctor De León Gómez**  
Director de Tesis

---

**Dr. Francisco Medina Barrera**  
Co-Director de Tesis

---

**Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta**  
Co-Director de Tesis

---

**Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández**  
Co-Director de Tesis

---

**Prof. Dr. Christoph Schüth**  
Co-Director de Tesis

---

**Prof. Dr. Andreas Hoppe**  
Asesor Externo

*Por este medio declaro bajo protesta de decir la verdad, de haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios, herramientas y metodologías descritas en la misma. Toda la información utilizada de la literatura ha sido citada debidamente.*

*René Alberto Dávila Pórcel*

*6 de enero de 2011*

## **PREFACIO**

Esta investigación constituye el resultado de la tesis del programa de Doctorado en Ciencias con especialidad en Geociencias con una visión multidisciplinaria y con enfoque integral contenido en un solo documento. El programa de investigación, contempló la optimización de las capacidades para evaluar problemas ambientales referidos a la exploración, explotación, suministro y uso del agua subterránea de buena calidad en ciudades medianas de países latinoamericanos que actualmente no tienen programas de planificación territorial tomando en cuenta el agua subterránea como un recurso limitado.

Como parte del programa desarrollado se tuvieron períodos de trabajo de campo en México y formación especial en Alemania. En México la institución responsable fue la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En Alemania la formación fue provista por el Instituto de Geociencias Aplicadas (Institut für Angewandte Geowissenschaften) de la Technische Universität Darmstadt.

Este documento forma parte del proyecto académico entre el Servicio de Intercambio Académico Alemán (Deutscher Akademischer Austausch Dienst/DAAD) y la Facultad de Ciencias de la Tierra/UANL denominado “Programa Regional de Doctorado - DAAD”. Este tiene entre sus objetivos fomentar la formación de profesionales de alto nivel académico en Latinoamérica y fortalecer los nexos científicos y académicos entre Alemania y los países participantes, en el caso particular México por medio de la Universidad Autónoma de Nuevo León y Bolivia con la participación del becario.

## DEDICATORIA

*A Dios por regalarme la “vida”, mostrarme las puestas para que recorra los caminos correctos y por brindarme la energía y fuerza para conseguir los objetivos anhelados.*

*A mis padres: Lidia Pórcel Dúran y René Dávila Cruz por ser mis creadores, por apoyarme incondicionalmente todo tiempo, por su comprensión, paciencia y cariño y fe hacia mi persona. Por apoyar mis decisiones y darme la confianza para lograr una superación constante como ser humano.*

*A todos los miembros de las familias: Dávila Cruz y Pórcel Dúran por su inquebrantable apoyo moral.*

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Servicio de Intercambio Académico Alemán (DAAD) y la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), por su solidaridad con los países en desarrollo. Tengo la certeza de que en un futuro cercano este apoyo será cada vez más fraterno, igualitario e incluyente.

A la Dirección de la Facultad de Ciencias de la Tierra gestión 2007-2010 bajo la responsabilidad del Dr. Héctor De León Gómez. A los planteles académicos y administrativos de la Facultad de Ciencias de la Tierra – UANL y del Institut für Angewandte Geowissenschaften - TU Darmstadt por su valiosa y desinteresada cooperación para desarrollar la investigación.

A los proyectos PAICyT (CT-1584-07 y CT-124-09) que financiaron las etapas de trabajo de campo y análisis de muestras.

Al Dr. Héctor De León Gómez por la dirección y supervisión de esta tesis. Su ayuda y colaboración durante todo el programa es muy agradecida.

Al Prof. Dr. Andreas Hoppe, por su confianza y determinación para apoyar el periodo de formación académica en Alemania y por brindarme todo el apoyo logístico, técnico y profesional en Darmstadt-Alemania.

Al Prof. Dr. Christoph Schüth, por su invaluable cooperación en mi formación académica, por sus asesorías y trabajo mancomunado y fraterno en la elaboración de los artículos científicos. Su franca y sincera amistad, además de su fe hacia mi persona.

Al comité de revisión de la tesis por sus valiosas observaciones y su constante seguimiento en el desarrollo de este trabajo de investigación, así como al comité de evaluación de examen pre-doctoral, por su importante e imparcial participación en la evaluación de mis capacidades académicas y personales.

A los amigos y alumnos de ambas facultades por su apoyo en el trabajo de campo y en gabinete y por todos los felices momentos compartidos.

Más que una tesis, gane familias durante esta aventura de vida, quiero agradecer a las familias Galicia-Martínez (Monterrey), Martínez-Rodríguez (Monterrey), Treviño-García (Linares) y Alva-Gutiérrez (Linares).

***¡Muchísimas Gracias!***

***René Alberto Dávila Pórcel***

## RESUMEN

El rol multidimensional que juega el territorio en la preservación y conservación del medio ambiente lo identifica como un factor clave para el desarrollo sostenible, por lo que la planificación y la gestión de los usos de suelo es un tema prioritario en el foro de la discusión mundial.

Por otra parte, el agua considerada como un recurso natural limitado ha sido y será el motor que permita la sobrevivencia de la humanidad, quedando demostrado que las aguas subterráneas y superficiales son las fuentes más importantes de agua dulce accesibles en el planeta Tierra. Las comunidades humanas demandan grandes cantidades de agua para su desarrollo. Estas comunidades concentradas en áreas reducidas, deterioran la disponibilidad de los recursos hídricos generando a la vez enormes cantidades de efluentes industriales y aguas residuales que generan contaminación de las fuentes de suministro de agua.

Los mecanismos y factores que interactúan desde la explotación hasta la descarga del agua en los medios urbanos se pueden estudiar aplicando la Hidrogeología Urbana, una nueva rama dentro de las Ciencias Hidrogeológicas. Las actividades antropogénicas, definidas a través del uso de suelo, modifican la calidad y cantidad del agua subterránea. Con una administración adecuada del uso de suelo, se genera desarrollo económico y social en las comunidades humanas, de lo contrario se convierte en el medio idóneo de los procesos de contaminación de suelos y agua.

Con el objetivo de analizar la relación existente entre el agua subterránea y el uso de suelo se realizó la presente investigación multidisciplinaria aplicando metodologías geológicas, hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, de vulnerabilidad acuífera, del tipo de suelos y del impacto ambiental que genera la ciudad de Linares (Nuevo León, México) como caso estudio.

La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se aplicó para generar la Base de Datos, a partir de la cual se desarrolló una metodología que integra Criterios Múltiples de Decisión (CMD) para obtener mapas temáticos del uso de suelos sostenible, considerando conceptos y resultados de Hidrogeología Urbana como variables primordiales en los modelos de sostenibilidad orientados a la toma de decisiones adecuadas.

La metodología desarrollada optimiza las potencialidades de los SIG y del método matemático CMD, brindando versatilidad, aplicabilidad y coherencia en el manejo de información digital como herramienta clave enfocada a la planificación sostenible del desarrollo urbano de ciudades de Latinoamérica y del mundo.

## **ABSTRACT**

The multidimensional role that territory plays in preserving the global environment identifies it as a key factor for sustainable development. Therefore land planning and resources management is a key issue in global discussion forum.

On the other hand, water considered a limited natural resource, has been and will be the engine that allows the survival of the humankind. It is evident that ground and surface water are the sources of largest and most important accessible freshwater on Earth. Human communities demand large amounts of water for their development. These in small areas concentrated communities impair the availability of water resources and generate huge amounts of industrial effluents and wastewater. These activities generate groundwater pollution.

The interaction of mechanisms and factors from groundwater exploitation to its discharge in urban environments can be studied applying Urban Hydrogeology, a new branch in Hydrogeological Sciences. Anthropogenic activities, defined through the land-use, affect the groundwater quality and quantity. A proper land-use management generates economic and social development in human communities; otherwise it becomes the ideal media of soil and water pollution processes.

In order to analyze the relationship between groundwater and land-use, a multidisciplinary research was developed using different methods of geology, hydrogeology, hydrogeochemistry, aquifer vulnerability, soil analysis and the determination of environmental impact generated in Linares area (Nuevo Leon, Mexico), as a case study.

The Geographic Information Systems (GIS) technology was used for the generation of a database, in order to develop an integrative methodology involving Multiple Criteria Decision (MCD) methods to obtain thematic maps of sustainable land-use. This analysis considers the concepts and results of Urban Hydrogeology as key variables in models of sustainability and appropriate decision-making assessment.

The methodology optimizes the potentials of GIS and the mathematical method MCD, providing versatility, applicability and consistency of digital information management as a key tool to reach sustainable planning of urban development in cities of Latin America and the world.

# CONTENIDO

CONTENIDO .....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABLAS.....	xviii
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	4
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 Objetivo.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 DELIMITACIÓN DEL ALCANCE DE LA TESIS .....	6
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
1.6 APORTACIÓN CIENTÍFICA .....	9
1.7 ARTÍCULOS Y PONENCIAS EN SEMINARIOS RELACIONADOS AL DESARROLLO DE LA TESIS.....	9
1.7.1 Descripción de las publicaciones científicas .....	9
1.7.2 Ponencias en congresos y seminarios internacionales .....	10
<b>2. GENERALIDADES .....</b>	<b>12</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	12
2.2 ACTUALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL MUNDO .....	12
2.3 AGUA SUBTERRÁNEA, POBLACIÓN Y DESARROLLO SOSTENIBLE.....	14
2.4 SITUACIÓN HÍDRICA DE MÉXICO .....	17
2.5 GEOGRAFÍA FÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	22
2.5.1 Localización .....	22
2.5.2 Clima.....	22
2.5.3 Suelos y Vegetación .....	24
2.5.4 Hidrología .....	24
2.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	25
2.6.1 Definición de Sistema de Información Geográfica (SIG) .....	27
2.6.2 Los SIG como modelos de la realidad .....	29
2.6.3 Visión General del Software desarrollado para los SIG .....	30
2.7 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES .....	32
<b>3. MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>34</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	34
3.2 EVOLUCIÓN PALEOGEOGRÁFICA.....	34
3.2.1 Formación del Golfo de México .....	35
3.2.2 Deformación Laramide.....	36

3.3	<i>ESTRATIGRAFÍA DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO</i> .....	37
3.3.1	Triásico Tardío.....	39
3.3.2	Jurásico.....	39
3.3.3	Cretácico.....	40
3.4	<i>ESTRATIGRAFÍA DE LA PLANICIE COSTERA DEL GOLFO DE MÉXICO</i> .....	42
3.5	<i>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL</i> .....	47
3.6	<i>CONCLUSIONES</i> .....	52
<b>4.</b>	<b>MARCO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PABLILLO</b> .....	<b>54</b>
4.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	54
4.2	<i>CUENCA HIDROGRÁFICA Y SISTEMA DE DRENAJE</i> .....	55
4.2.1	Morfología.....	55
4.2.2	Parámetros Físicos de la CHRP.....	56
4.2.3	Parámetros del Sistema de Drenaje.....	58
4.2.4	Tiempo de concentración (Tc).....	63
4.3	<i>ANÁLISIS DE DATOS CLIMATOLÓGICOS</i> .....	64
4.3.1	Precipitación.....	64
4.3.2	Temperatura.....	67
4.3.3	Evaporación y Evapotranspiración.....	70
4.3.4	Hidrometría de la Cuenca Hidrológica del Río Pabillo.....	72
4.4	<i>ESTIMACIÓN DE DEMANDAS</i> .....	75
4.4.1	Uso Doméstico y Urbano.....	76
4.4.2	Uso Industrial.....	76
4.4.3	Uso Agrícola.....	77
4.5	<i>PRESA JOSÉ LÓPEZ PORTILLO (CERRO-PRIETO)</i> .....	77
4.6	<i>CONCLUSIONES</i> .....	78
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA</b> .....	<b>80</b>
5.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	80
5.2	<i>HIDROESTRATIGRAFÍA</i> .....	82
5.3	<i>CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS</i> .....	84
5.3.1	Magnitud y Distribución de la Conductividad Hidráulica.....	84
5.4	<i>RÉGIMEN HIDROGEOLÓGICO</i> .....	86
5.4.1	Sistemas de Flujo de Agua Subterránea.....	86
5.4.2	Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico.....	88
5.5	<i>RECARGA</i> .....	91
5.6	<i>COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO</i> .....	92
5.7	<i>MUESTREO Y ANÁLISIS EN LABORATORIO HIDROGEOQUÍMICO</i> .....	94
5.7.1	Métodos analíticos hidrogeoquímicos.....	98
5.7.2	Base de datos hidrogeoquímicos.....	99
5.8	<i>RESULTADOS E INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA</i> .....	105

5.8.1 Distribución de parámetros físicos y especies hidrogeoquímicas .....	105
5.8.2 Sólidos totales disueltos.....	108
5.8.3 Cationes.....	108
5.8.4 Aniones.....	110
5.8.5 Caracterización del agua subterránea .....	111
5.8.6 Análisis Multivariado.....	113
5.8.7 Evolución Hidrogeoquímica .....	118
<b>5.9 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>119</b>
5.9.1 Calidad de agua para consumo humano.....	119
5.9.2 Calidad de agua para actividades agrícolas .....	123
<b>5.10 CONCLUSIONES .....</b>	<b>126</b>
<b>6. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y ÁREAS DE RIESGO A LA CONTAMINACIÓN .....</b>	<b>128</b>
6.1 INTRODUCCIÓN .....	128
6.2 MÉTODO DRASTIC .....	130
6.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	131
6.3.1 “D”-Profundidad del nivel freático.....	132
6.3.2 “R”-Recarga neta.....	133
6.3.3 “A”-Medio Acuífero .....	134
6.3.4 “S”-Suelos.....	135
6.3.5 “T”-Pendiente Topografía .....	136
6.3.6 “I”-Impacto de la zona no saturada .....	137
6.3.7 “C”-Conductividad Hidráulica .....	138
6.4 ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA PARA EL AÑO 1981 .....	139
6.5 VALIDACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA .....	141
6.6 USO DE SUELOS Y SU INFLUENCIA EN EL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN.....	144
6.7 ÍNDICE DEL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN.....	146
6.8 CONCLUSIONES .....	147
<b>7. HIDROGEOLOGÍA URBANA .....</b>	<b>151</b>
7.1 INTRODUCCIÓN .....	151
7.2 RELACIÓN ENTRE LOS PROCESOS DE URBANIZACIÓN Y EL AGUA SUBTERRÁNEA.....	152
7.3 PROCESOS Y EFECTOS HIDROGEOLÓGICOS QUE INVESTIGA LA HIDROGEOLOGÍA URBANA.....	154
7.3.1 Recarga de agua subterránea .....	154
7.3.2 Sistemas de flujo del agua subterránea .....	155
7.3.3 Calidad del agua subterránea y principales contaminantes .....	156
7.3.4 Sobreexplotación de acuíferos.....	159
7.3.5 Fluctuaciones del nivel freático .....	159
7.3.6 Subsistencia del terreno .....	161
7.3.7 Intrusión salina en ciudades costeras .....	162
7.4 POLÍTICAS DE GESTIÓN AMBIENTAL RELACIONADAS A LA HIDROGEOLOGÍA URBANA .....	163

7.5 <i>HIDROGEOLOGÍA URBANA DE LINARES</i> .....	164
7.5.1 Análisis poblacional y crecimiento físico.....	166
7.5.2 Análisis de la explotación, distribución, uso y desecho del agua subterránea.....	169
7.5.3 Comportamiento del nivel freático entre 2003 y 2007 .....	177
7.5.4 Calidad del agua subterránea de 1981 a 2009.....	179
7.5.5 Posibles fuentes contaminantes .....	180
7.5.6 Propuestas de gestión del agua subterránea .....	185
7.6 <i>CONCLUSIONES</i> .....	186
<b>8. PLANIFICACIÓN TERRITORIAL SOSTENIBLE</b> .....	189
8.1 <i>INTRODUCCIÓN</i> .....	189
8.2 <i>DESARROLLO SOSTENIBLE INTEGRANDO EL AGUA SUBTERRÁNEA, LOS USOS DE SUELO Y LAS NECESIDADES DE LA SOCIEDAD</i> .....	191
8.2.1 Análisis conceptual del Desarrollo Sostenible .....	192
8.2.2 La importancia del agua subterránea en el desarrollo sostenible.....	194
8.3 <i>LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL</i> .....	197
8.4 <i>LOS CRITERIOS MÚLTIPLES DE DECISIÓN EN LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO</i> .....	198
8.4.1 Técnicas de decisión Multi-Atributo y Multi-Objetivo.....	199
8.4.2 Las técnicas de decisión multicriterio (DMC).....	200
8.5 <i>PLANIFICACIÓN TERRITORIAL SOSTENIBLE Y TOMA DE DECISIONES EN EL DOMINIO ESPACIAL</i> .	200
8.6 <i>PLANIFICACIÓN TERRITORIAL HIDROGEOLOGÍCAMENTE SOSTENIBLE DEL ÁREA DE LA CIUDAD DE LINARES</i> .....	203
8.6.1 Etapa I - Necesidad.....	203
8.6.2 Etapa II – Diseño.....	204
8.6.3 Etapa III - Inteligencia.....	205
8.6.4 Etapa IV – Decisión.....	212
8.7 <i>CONCLUSIONES</i> .....	223
<b>9. CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	226
<b>10. REFERENCIAS</b> .....	229

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1.

<b>Figura 1.1</b> Región Citrícola de la Ciudad de Linares (Fuente: Héctor De León Gómez) .....	3
---	---

## CAPÍTULO 2.

<b>Figura 2.1</b> Distribución Global de Agua en el Mundo .....	12
<b>Figura 2.2</b> Ciclo Global del Agua.....	13
<b>Figura 2.3</b> Fuentes de Agua Dulce en el Mundo. ....	14
<b>Figura 2.4</b> Comportamiento de la población por sectores urbano y rural de 1950 al 2010.....	15
<b>Figura 2.5</b> Ejemplo de concentración poblacional en centros urbanos.....	16
<b>Figura 2.6</b> Vertido de aguas residuales a ríos .....	16
<b>Figura 2.7</b> Valores Medios Anuales del Ciclo Hidrológico en México .....	18
<b>Figura 2.8</b> Regiones Hidrológicas de México.....	18
<b>Figura 2.9</b> Disponibilidad Natural de Agua Per Cápita entre 1950-2000.....	19
<b>Figura 2.10</b> Delimitación de Acuíferos por región Hidrológico-Administrativa .....	20
<b>Figura 2.11</b> Disponibilidad de agua subterránea en México.....	21
<b>Figura 2.12</b> Localización del área de estudio .....	23

## CAPÍTULO 3.

<b>Figura 3.1</b> Relaciones crono-estratigráfica, sedimentológica y paleogeográfica del Noreste de México.....	38
<b>Figura 3.2</b> Relación de pendiente y formación de terrazas aluviales. ....	45
<b>Figura 3.3</b> Ubicación de las terrazas aluviales sobre las formaciones geológicas .....	47
<b>Figura 3.4</b> Red de Fracturas sitio M-02 .....	48
<b>Figura 3.5</b> Red de Fracturas sitio M-03 .....	48
<b>Figura 3.6</b> Red de Fracturas sitio M-04 .....	48
<b>Figura 3.7</b> Red de Fracturas sitio M-06 .....	49
<b>Figura 3.8</b> Red de Fracturas sitio M-07 .....	49
<b>Figura 3.9</b> Red de Fracturas sitio M-08 .....	49
<b>Figura 3.10</b> Red de Fracturas sitio M-09 .....	50
<b>Figura 3.11</b> Red de Fracturas sitio M-10 .....	50
<b>Figura 3.12</b> Red de Fracturas sitio M-11 .....	50
<b>Figura 3.13</b> Red de Fracturas sitio M-12 .....	51
<b>Figura 3.14</b> Red de Fracturas sitio M-14 .....	51
<b>Figura 3.15</b> Mapa Geológico – Estructural de la Cuenca del Río Pablillo.....	52

## CAPÍTULO 4.

<b>Figura 4.1</b> Puntos generados para determinar la altura media de la CHRP.....	57
<b>Figura 4.2</b> Orden de Corrientes de la CHRP. ....	59
<b>Figura 4.3</b> Red de Cauces de la CHRP.....	60

<b>Figura 4.4</b> Áreas de captación de la cuenca CHRP. ....	62
<b>Figura 4.5</b> Precipitación Media Mensual 1982-2007 .....	64
<b>Figura 4.6</b> Precipitación Máxima Mensual 1982-2007.....	65
<b>Figura 4.7</b> Precipitación Anual Acumulada 1982-2007 .....	66
<b>Figura 4.8</b> Cálculo de la precipitación promedio sobre el área de estudio (Método de Thiessen). ....	67
<b>Figura 4.9</b> Temperatura Media Mensual 1982-2007 .....	68
<b>Figura 4. 10</b> Temperatura Máxima Anual .....	69
<b>Figura 4.11</b> Temperatura Mínima Anual. ....	69
<b>Figura 4.12</b> Evaporación Media Anual .....	70
<b>Figura 4.13</b> Caudal Medio río Pablillo. ....	73
<b>Figura 4.14</b> Caudal Acumulado río Pablillo .....	74
<b>Figura 4.15</b> Caudal Medio ríos Hualahuises y Camacho .....	74
<b>Figura 4.16</b> Caudal Acumulado ríos Hualahuises y Camacho .....	75

## **CAPÍTULO 5.**

<b>Figura 5.1</b> Distribución en planta de las unidades hidroestratigráficas.....	83
<b>Figura 5.2</b> Representación morfológica de la base del acuífero de poros.....	83
<b>Figura 5.3</b> Sistemas de Flujo (local, intermedio y regional) presentes en la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo. Indicando fenómenos naturales producidos en los medios de flujo subterráneo ...	87
<b>Figura 5.4</b> Ubicación de Manantiales en la CHRP. ....	91
<b>Figura 5.5</b> Carta piezométrica (Noviembre-1981) .....	92
<b>Figura 5.6</b> Carta piezométrica (Marzo - 2009) .....	93
<b>Figura 5.7</b> Toma de muestras marzo 2008 (Vivienda ubicada en la zona industrial de Linares).....	94
<b>Figura 5.8</b> Medición de parámetros in situ (Ingreso a colonia Camachito) .....	95
<b>Figura 5.9</b> Equipo ICP-OS laboratorio de hidroquímica TU-Darmstadt.....	98
<b>Figura 5.10</b> Equipo de Absorción Atómica. Laboratorio de Hidroquímica de la TU-Darmstadt.....	99
<b>Figura 5.11</b> Distribución de la Temperatura °C.....	106
<b>Figura 5.12</b> Distribución de la Conductividad Eléctrica (µS/cm).....	106
<b>Figura 5.13</b> Distribución del pH en 2009.....	107
<b>Figura 5.14</b> Distribución del Eh en 2009 .....	107
<b>Figura 5.15</b> Distribución de Sodio .....	108
<b>Figura 5.16</b> Distribución de Potasio .....	108
<b>Figura 5.17</b> Distribución de Calcio.....	109
<b>Figura 5.18</b> Distribución de Magnesio .....	109
<b>Figura 5.19</b> Distribución de Cloruros.....	110
<b>Figura 5.20</b> Distribución de Sulfatos .....	110
<b>Figura 5.21</b> Distribución de Bicarbonatos .....	111
<b>Figura 5.22</b> Diagrama de Piper, año 1981 (Muestras tabla 5.8). ....	112
<b>Figura 5.23</b> Diagrama de Piper, año 1994 (Muestras tabla 5.9). ....	112
<b>Figura 5.24</b> Diagrama de Piper, año 2009 (Muestra tabla 5.10).....	113
<b>Figura 5.25</b> Dendograma generado a partir del análisis de cluster jerárquico, muestras de 1981.....	115

<b>Figura 5.26</b> Dendograma generado a partir del análisis de cluster jerárquico, muestras de 2009.....	116
<b>Figura 5.27</b> Distribución de los grupos identificados en el análisis de clusters, caso 1981.....	117
<b>Figura 5.28</b> Distribución de los grupos identificados en el análisis de clusters, caso 2009.....	118
<b>Figura 5.29</b> Distribución del índice SAR en el área de estudio.....	126

## **CAPÍTULO 6.**

<b>Figura 6.1</b> Mapa piezométrico según valoración tabla 6.1 (marzo 2009). .....	132
<b>Figura 6.2</b> Recarga del acuífero según valoración tabla 6.2 (marzo 2009). .....	133
<b>Figura 6.3</b> Distribución de acuíferos según valoración tabla 6.3 (marzo 2009).....	134
<b>Figura 6.4</b> Suelos del área de estudio según valoración tabla 6.4 (marzo 2009). .....	135
<b>Figura 6.5</b> Relieve topográfico (m.s.n.m.) según valoración tabla 6.5 (marzo 2009). .....	136
<b>Figura 6.6</b> Litología de la zona no saturada según valoración tabla 6.6 (marzo 2009).....	137
<b>Figura 6.7</b> Conductividad hidráulica según valoración tabla 6.7 (marzo 2009).....	138
<b>Figura 6.8</b> Índice de vulnerabilidad DRASTIC – 2009. ....	139

## **CAPÍTULO 7.**

<b>Figura 7.1</b> Esquema teórico de la situación de la Ciudad pre-industrial.....	152
<b>Figura 7.2</b> Esquema teórico de la situación de la ciudad pre-industrial .....	153
<b>Figura 7.3</b> Esquema teórico de la situación de la Ciudad post-industrial .....	153
<b>Figura 7.4</b> Esquema teórico de la situación de la Ciudad bajo crecimiento poblacional y cambio climático .....	154
<b>Figura 7.5</b> Crecimiento físico de la mancha urbana de la ciudad de Linares entre 1981 y 2009.....	166
<b>Figura 7.6</b> Distribución de la población urbana de la ciudad de Linares (2005) .....	167
<b>Figura 7.7</b> Distribución de la densidad poblacional .....	168
<b>Figura 7.8</b> Distribución de pozos de extracción .....	169
<b>Figura 7.9</b> Sistema de distribución de agua potable en la ciudad de Linares .....	172
<b>Figura 7.10</b> Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario en la ciudad de Linares .....	176
<b>Figura 7.11</b> Variación del nivel freático entre 2003-2007, pozo en el noreste de Linares. ....	177
<b>Figura 7.12</b> Variación del nivel freático entre 2003-2007 pozo en el centro de Linares .....	178
<b>Figura 7.13</b> Variación del nivel freático entre 2003-2007 pozo en al este de Linares .....	178
<b>Figura 7.14</b> Diagrama de Piper para el total de las muestras de la base de Datos 1981-2009 .....	180
<b>Figura 7.15</b> Áreas de cultivo colindantes a la ciudad de Linares (Fuente: Héctor De León Gómez).....	181
<b>Figura 7.16</b> Posibles fuentes de contaminación en el área urbana de Linares.....	182

## **CAPÍTULO 8.**

<b>Figura 8.1</b> Marco conceptual para el desarrollo sostenible.....	194
<b>Figura 8.2</b> Integración de tres pirámides de necesidades sociales .....	195
<b>Figura 8.3</b> Diagrama de flujo para la toma de decisiones.....	202
<b>Figura 8.4</b> Distribución geográfica de las restricciones.....	207
<b>Figura 8.5</b> Distribución geográfica de las influencias .....	210
<b>Figura 8.6</b> Situación para el Escenario A: Interacción de factores de influencia. ....	213

<b>Figura 8.7</b> Situación para el Escenario A: Modelo final.....	214
<b>Figura 8.8</b> Situación para el Escenario B: Interacción de factores de influencia. ....	215
<b>Figura 8.9</b> Situación para el Escenario B: Modelo final.....	216
<b>Figura 8.10</b> Situación para el Escenario C: Interacción de factores de influencia. ....	217
<b>Figura 8.11</b> Situación para el Escenario C: Modelo final.....	218
<b>Figura 8.12</b> Situación para el Escenario D: Interacción de factores de influencia. ....	219
<b>Figura 8.13</b> Situación para el Escenario D: Modelo final .....	220
<b>Figura 8.14</b> Situación para el Escenario E: Interacción de factores de influencia. ....	221
<b>Figura 8.15</b> Situación para el Escenario E: Modelo final .....	222

# LISTA DE TABLAS

## CAPÍTULO 2.

<b>Tabla 2.1</b> Incremento Poblacional de México entre 1950 al 2005 (millones de habitantes) .....	17
<b>Tabla 2.2</b> Incremento de la sobreexplotación de acuíferos en México .....	21
<b>Tabla 2.3</b> Cronología de la Evolución de los SIG en relación a los eventos formativos previos en Tecnología y otros contextos .....	26
<b>Tabla 2.4</b> Resumen de software creado para los Sistemas de Información Geográfica.....	31

## CAPÍTULO 4.

<b>Tabla 4.1</b> Clasificación según el tamaño de cuenca .....	56
<b>Tabla 4.2</b> Pendientes obtenidas para los tramos del río Pablillo.....	61
<b>Tabla 4.3</b> Porcentaje de horas de sol.....	71
<b>Tabla 4.4</b> Temperatura Media Mensual periodo 1982-2007.....	72
<b>Tabla 4.5</b> Requerimientos típicos de agua para uso Domestico-Urbano .....	76
<b>Tabla 4.6</b> Requerimientos típicos de agua para uso Industrial .....	76
<b>Tabla 4.7</b> Requerimientos típicos de agua para uso Agrícola .....	77

## CAPÍTULO 5.

<b>Tabla 5.1</b> Estudios de Bombeo realizados en pozos de la FCT en 1995.....	84
<b>Tabla 5.2</b> Transmisividad de pozos evaluados en 1995. ....	85
<b>Tabla 5.3</b> Clasificación de aguas minerales y termales según Schoeller (1962). ....	88
<b>Tabla 5.4</b> Clasificación de aguas minerales y termales según Bogomolov (1966).....	89
<b>Tabla 5.5</b> Clasificación del aguas de manantial para la región de Linares (Werner, 1996). ....	90
<b>Tabla 5.6</b> Mapas Piezométricos generados entre 1981-2009 .....	93
<b>Tabla 5.7</b> Parámetros fisicoquímicos de campo de muestras de agua colectadas en el área de estudio en los años 1981, 2000, 2001, 2001, 2002, 2007, 2008 y 2009 .....	96
<b>Tabla 5.8</b> Iones Mayores y balance iónico de muestras de 1981 (INEGI, 1983a) .....	100
<b>Tabla 5.9</b> Iones Mayores y balance iónico de muestras de 1994 (Galván-Mancilla, 1996).....	101
<b>Tabla 5.10</b> Iones Mayores y balance iónico de muestras de 2009. ....	104
<b>Tabla 5.11</b> Calidad de agua subterránea entre 1981 y 2009 .....	111
<b>Tabla 5.12</b> Comparación de las muestras de 1981, con normas WHO.....	119
<b>Tabla 5.13</b> Comparación de las muestras de 1994, con normas WHO.....	120
<b>Tabla 5.14</b> Comparación de las muestras de 2009, con normas WHO.....	121
<b>Tabla 5.15</b> Incumplimiento porcentual de la norma WHO en 1981 .....	122
<b>Tabla 5.16</b> Incumplimiento porcentual de la norma WHO en 1994 .....	122
<b>Tabla 5.17</b> Incumplimiento porcentual de la norma WHO en 2009 .....	122
<b>Tabla 5.18</b> Calidad de Agua para Riego (muestras 1981) .....	124
<b>Tabla 5.19</b> Calidad de Agua para Riego (muestras 1994) .....	124
<b>Tabla 5.20</b> Calidad de Agua para Riego (muestras 2009) .....	125

## **CAPÍTULO 6.**

<b>Tabla 6.1</b> Asignación de valores e índices de ponderación para el nivel freático .....	133
<b>Tabla 6.2</b> Asignación de valores e índices de ponderación para la recarga .....	134
<b>Tabla 6.3</b> Asignación de valores e índices de ponderación para el medio acuífero .....	135
<b>Tabla 6.4</b> Asignación de valores e índices de ponderación para el tipo de suelo.....	136
<b>Tabla 6.5</b> Asignación de valores e índices de ponderación para la pendiente topográfica.....	137
<b>Tabla 6.6</b> Asignación de valores e índices de ponderación para la zona no saturada.....	138
<b>Tabla 6.7</b> Asignación de valores e índices de ponderación para la conductividad hidráulica .....	138
<b>Tabla 6.8</b> Valoración para Usos de Suelo típicos .....	145
<b>Tabla 6.9</b> Comparación de Resultados entre el IVD y el IRC. ....	146
<b>Tabla 6.10</b> Comparación de Resultados entre el IVD-1981 e IVD-2009. ....	148

## **CAPÍTULO 7.**

<b>Tabla 7.1</b> Densidad Poblacional por áreas de control poblacional .....	168
<b>Tabla 7.2</b> Volumen extraído entre los años 2003-2007 en la ciudad de Linares .....	170
<b>Tabla 7.3</b> Volumen extraído entre los años 2003-2007 en la ciudad de Hualahuis .....	170
<b>Tabla 7.4</b> Volumen que pueden contener los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario .....	171
<b>Tabla 7.5</b> Número total de usuarios en la ciudad de Linares gestiones 2003 a 2007.....	173
<b>Tabla 7.6</b> Volumen total de agua potable facturado para los años 2003-2007.....	173
<b>Tabla 7.7</b> Comparación volumen explotado y volumen entregado.....	174
<b>Tabla 7.8</b> Clasificación de los usuarios de agua potable por actividad en la ciudad de Linares .....	174
<b>Tabla 7.9</b> Cobertura de servicios básicos en la ciudad de Linares .....	176

## **CAPÍTULO 8.**

<b>Tabla 8.1</b> Pasos necesarios en el tiempo para lograr el desarrollo sostenible de la integración de parámetros hidrogeológicos, uso de la tierra, y las necesidades socio-económicas .....	197
<b>Tabla 8.2</b> Pesos de importancia relativa para los 3 escenarios propuestos .....	212

# 1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo está destinado a definir los antecedentes, motivación, limitaciones, objetivos y estructura de la tesis. Se describen brevemente las participaciones en congresos y artículos científicos producto del desarrollo de la investigación.

## 1.1 ANTECEDENTES

El crecimiento demográfico de las poblaciones, el desarrollo económico e industrial durante el siglo XX, ha desequilibrado a nivel global la relación de disponibilidad y uso de los recursos hídricos, esta situación se reconoce en la Declaración del Milenio de las Naciones Unidas expresando que: *“para detener la explotación no sostenible de los recursos hídricos, deben desarrollarse estrategias de gestión del agua a escala, nacional, regional y local, que promuevan tanto el acceso equitativo como el abastecimiento adecuado”* (NU, 2000).

En ocasión de la Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, 1992), se definió el objetivo general de la política de agua, que se expresa en el capítulo 18 de la Agenda 21: *“El agua se necesita en todos los aspectos de la vida. El objetivo general es garantizar que se mantenga un abastecimiento adecuado de agua de buena calidad para toda la población de este planeta, al tiempo que se preservan las funciones hidrológicas, biológicas y químicas de los ecosistemas, adoptando las actividades humanas dentro de los límites de capacidad de la naturaleza y luchando contra los vectores de las enfermedades relacionadas con el agua”*, en dicha cumbre se declaró también que: *“Los seres humanos son el centro de atención del desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida sana y productiva en armonía con la naturaleza”*. Ambas declaraciones, surgen a consecuencia de las explotaciones insostenibles de los recursos hídricos a nivel mundial, que ponen en riesgo la integridad de la salud de millones de personas (NU, 1992; UNESCO, 2003).

Dichas estrategias deben ser orientadas a proteger las aun escasas fuentes de agua dulce y reducir los procesos contaminantes, tal como se afirma en la declaración del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés): *“el agua dulce es esencial para la salud humana, la agricultura, la industria y los ecosistemas naturales y ahora se está convirtiendo en un bien escaso en muchas regiones del mundo”* (UNESCO, 2003).

Es importante destacar que el agua es parte integral indivisible del desarrollo sostenible reconocida como una de las cinco principales temáticas de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDS), (Johannesburgo Agosto-Septiembre, 2002) y son: agua y saneamiento, energía, salud, agricultura y biodiversidad. También se declaró, que el agua es factor relevante de las vertientes del desarrollo: social, económico y medio ambiental (NU, 2003; UNESCO, 2003).

La disponibilidad y uso del recurso agua están cambiando y las actuales áreas clave de estudio son: la escasez de agua, su calidad y los desastres naturales relacionados con ella. Los desequilibrios entre uso y disponibilidad se hacen cada día más evidentes en áreas urbanas con elevada concentración poblacional y desarrollo industrial.

La agricultura sin duda es la principal actividad en áreas rurales que demanda grandes volúmenes de agua. Actualmente la creciente demanda de alimentos hace que esta actividad sea ampliamente desarrollada en regiones con serias limitaciones de recursos hídricos, donde la explotación y sobreexplotación de acuíferos se ha generalizado permitiendo el desarrollo económico de estas zonas en detrimento de la calidad y cantidad de las aguas subterráneas.

La calidad de vida en las ciudades y su entorno depende principalmente de la explotación de recursos hídricos, del acceso a los servicios básicos (agua potable, tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos) que son tareas primordiales para garantizar la salud pública y el desarrollo sostenible de las comunidades.

Generalmente, tres son los factores (Población – Agua – Desarrollo Sostenible) que gobiernan la actividad urbana de manera interdependiente formando una trilogía inseparable, el equilibrio de la misma garantiza el futuro de los asentamientos humanos.

En lo que se refiere a población, más del 50% de la actual población mundial vive en ciudades y su proporción crece extremadamente rápido en países desarrollados hasta alcanzar el ~90% del total de la población. Los países en vías de desarrollo y con economías emergentes carecen de planificación urbana estratégica, hecho que deriva en pobres sistemas sanitarios y desarrollo industrial descontrolado, paralelamente, dependen del agua subterránea para su desarrollo (Lerner, 2004).

El crecimiento poblacional a nivel mundial y la combinación de explotación irracional de los recursos hídricos, así como la emisión de aguas de desecho, derivan en un escenario conflictivo que contamina el medio ambiente y compromete el futuro de las nuevas generaciones en áreas urbanas.

En las últimas décadas esta problemática afectó a muchas ciudades del mundo, principalmente las que se localizan en áreas semiáridas y áridas, donde las condiciones climatológicas limitan la disponibilidad de agua en cantidad y calidad, como por ejemplo: El Cairo (Egipto), Sana'a (Yemen), Eritrea (África Oriental) entre muchas otras (Klimas, 1995; Lerner, 2004).

México no está exento de esta realidad donde muchas ciudades se desarrollan y expanden rápidamente como producto de las actividades agrícolas e industriales. La Ciudad de Linares (CL) catalogada como la segunda ciudad de importancia en el Estado de Nuevo León fuera del Área Metropolitana de Monterrey, es un centro de vinculación entre el norte y el sur del estado, esta vialmente conectada con los municipios de Iturbide y Galeana por la carretera estatal No. 31. A nivel interestatal, la Carretera Federal No. 85 conecta los Estados de Tamaulipas y Nuevo León convirtiéndose en la generadora de desarrollo y de oportunidades económicas al área circundante a la CL.

Tradicionalmente la producción citrícola está fuertemente arraigada en la mayor parte del área del Municipio de Linares, siendo esta la principal actividad económica de las familias del sector. Por otra parte, el impulso y las facilidades del gobierno local fomentaron el emplazamiento de empresas de diversos sectores industriales, que durante la última década introdujeron un crecimiento importante en términos económicos.



**Figura 1.1** Región Citrícola de la Ciudad de Linares (**Fuente:** Héctor De León Gómez).

El crecimiento físico de la CL, la extensiva práctica de cultivos citrícolas y el emplazamiento de más industrias, no se encuentran dentro de un plan estratégico de crecimiento urbano, motivo por el cual los usos de suelo no son los más adecuados en la zona conurbada de Linares.

El importante reservorio de agua potable para el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) denominado Presa José López Portillo – Cerro Prieto (PCP) se encuentra localizado a ~12 km al nororiente de Linares, ciudad que por su posición aguas arriba del vaso de captación de la presa se convierte en una potencial fuente de contaminación de los recursos hídricos de la zona, exponiendo a la población del AMM y de la CL al consumo de agua eventualmente contaminada.

El Río Pablillo es el principal cauce superficial que abastece la PCP y que atraviesa la mancha urbana de la CL, adicionalmente otros ríos tributarios (Hualahuises, Camachito y Camacho) conforman la red hídrica de la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo (CHRP).

La combinación de los factores expuestos (crecimiento físico y poblacional acelerado, desarrollo industrial, extracción no planificada de agua subterránea, expansión de cultivos citrícolas, descarga de aguas residuales en ríos y arroyos, posible contaminación de acuíferos y calidad del agua de la presa Cerro-Prieto) deriva en un escenario de riesgo a situaciones ambientales y sociales posiblemente insostenibles, a la fecha esta problemática no está evaluada, esta realidad motivó el desarrollo de la presente investigación, debido a que la CL es el caso típico de una ciudad en actual crecimiento con un importante futuro económico, debido a que tiene industrias y actividad agropecuaria importante, actividades antrópicas que a su vez son potenciales fuentes de contaminación a los recursos hídricos de la zona.

Por las razones antes expuestas, la presente investigación justifica su desarrollo en la necesidad de implementar procedimientos adecuados que permitan el cumplimiento de las directrices mundiales de gestión integral del agua, suministro de calidad y manejo y mitigación de riesgos de contaminación hacia las fuentes de agua subterránea. La idea central del presente documento, es que se convierta en una importante herramienta para la gestión de recursos hídricos y la planificación territorial urbana y periurbana en los países no desarrollados.

## **1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Las actividades antropogénicas desarrolladas en la ciudad de Linares y sus alrededores (expansión urbana, crecimiento poblacional, mayor densidad automotriz, diversificación y mayor presencia industrial, extracción de mayores volúmenes de agua subterránea, descarga de considerables volúmenes de aguas residuales, desechos sanitarios de hospitales y presencia de botaderos y/o rellenos sanitarios) generan una gran variedad de contaminantes sólidos y líquidos, su inadecuada deposición y manejo ambiental hace presumir que se han vertido grandes volúmenes de contaminantes a los acuíferos de la zona que conforman el subsuelo de Linares y su zona conurbada. Paralelamente, las importantes actividades agrícolas y pecuarias en esta región

(plantaciones de cítricos y crianza de ganado vacuno) utilizan una gran variedad de pesticidas y fertilizantes para optimizar su producción y generan desechos orgánicos por medio de las eses fecales de los animales. Debido a la combinación de todas estas actividades, se presume que el subsuelo (suelo - roca - agua) del área poblada de Linares se encuentra contaminado como resultado del acelerado crecimiento doméstico, industrial y municipal de Linares.

La posible contaminación de los acuíferos de la zona pone en riesgo la calidad del agua subterránea de la región y del vaso de captación de la presa Cerro-Prieto, que son importantes fuentes de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de Linares y el Área Metropolitana de Monterrey respectivamente, todo este escenario afecta la salud de los habitantes de estos centros urbanos, por lo tanto es necesario investigar de que manera afecta la calidad del agua subterránea a la planificación territorial en los planes de desarrollo urbano.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo**

Verificar la aplicabilidad de la metodología de decisión multicriterio utilizando una base de datos generada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que incluya datos hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, de vulnerabilidad acuífera a la contaminación, el actual uso de suelos y la distribución poblacional como variables condicionantes en la asignación sostenible de usos de suelo futuros para ciudades en crecimiento y en constante expansión.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a. Identificación y verificación de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio.
- b. Análisis hidrológico de la Cuenca del Río Pablillo.
- c. Caracterización hidrogeológica de los acuíferos y sistemas de flujo.
- d. Determinación y clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea.
- e. Delimitar las unidades hidroestratigráficas de los acuíferos que componen el sistema.
- f. Actualización del mapa de usos de suelos de la Ciudad de Linares y su área periurbana.
- g. Cuantificación de la demanda de agua para Linares y sus alrededores.
- h. Determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.
- i. Desarrollar un sistema de información geográfica que permita integrar y analizar toda la información generada y recopilada.

#### **1.4 DELIMITACIÓN DEL ALCANCE DE LA TESIS**

Es importante establecer que este estudio se enfocó en la porción noreste de la CHRP, donde se intentó explicar los mecanismos de transporte, determinar la calidad del agua subterránea natural y/o influenciada por la actividad antropogénica, conocer el comportamiento de las extracciones en la zona, saber cómo interactúa el medio geológico, determinar la vulnerabilidad acuífera, así como el impacto de las actividades antropogénicas desarrolladas en los centros urbanos, destinados a un análisis con una visión integral con el objetivo de proponer futuros usos de suelo que permitan el desarrollo sostenible.

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos y el riesgo a la contaminación involucra fuentes dispersas de contaminantes (enfoque regional del proyecto). Se presume, que las potenciales fuentes contaminantes en el área de estudio están presentes tanto dentro de la ciudad de Linares (sistema de drenaje sanitario, restaurantes, hoteles, rastro municipal, talleres mecánicos, lavados automotrices, desechos industriales, etc.) como fuera de ella (agricultura y ganadería en vastas extensiones territoriales).

Para el desarrollo de la presente investigación, se gestionó y consiguió diferentes fuentes de soporte técnico y económico, debido a que la unidad académica no cuenta con los medios propios para solventar estudios a nivel doctoral. Las principales limitaciones enfrentadas en el desarrollo de la presente investigación fueron: la falta de una base de datos coherente y la disponibilidad de recursos económicos para la generación de datos en campo y su posterior análisis. Sin embargo, se contó con el apoyo económico de los proyectos PAICYT CT-1584-07 y CT-124-09 denominado Hidrogeología Urbana de la Ciudad de Linares N.L. apoyo logístico brindado por la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Institut für Angewandte Geowissenschaften de la Technische Universität Darmstadt durante la estancia científica realizada en Alemania entre abril a noviembre de 2009.

Las metodologías aplicadas y combinadas son de fácil implementación tecnológica, lo cual las hace apta para extender su aplicación a cualquier situación similar a la estudiada en la tesis. El procedimiento de análisis puede convertirse en una importante herramienta de gestión ambiental en un futuro cercano en los países en desarrollo y con economías emergentes donde los limitados recursos económicos destinados a la prevención de impactos ambientales comprometen la salud pública y la calidad ambiental de sus ciudades.

---

## 1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El desarrollo metodológico coherente combinado con el plan progresivo de trabajo previamente definido y en apego a los objetivos propuestos se definió la extensión del presente documento compuesto por 10 capítulos.

Los dos primeros capítulos definen el alcance y el entorno en el cual se desarrollo la investigación. Los siguientes capítulos del tercero al octavo se presentan siguiendo la estructura de artículos científicos compuestos por introducción, metodología, resultados y conclusiones, de tal manera que pueden ser consultados y analizados individualmente. El capítulo noveno presenta las conclusiones generales de la investigación y finalmente el capítulo decimo detalla la bibliografía revisada para la elaboración del presente documento.

Este formato, permite una lectura rápida y de fácil comprensión de los temas tratados, obteniéndose como resultado final un capítulo de conclusiones generales sobre la base del análisis integral de la información obtenida por medio del análisis de los resultados individuales en cada uno de los capítulos que componen este documento, los cuales son brevemente explicados a continuación:

**1. Introducción** Define los antecedentes generales al problema que motivo la investigación, los objetivos son expresados, también la delimitación del alcance de la investigación. Se presenta la descripción de la estructura de tesis adoptada y sus beneficios. Finalmente se listan los artículos científicos y participaciones en congresos desarrolladas paralelamente al presente documento y que contribuyen y fortalecen el programa académico de doctorado en ciencias.

**2. Generalidades** Está compuesto por un resumen sobre la actualidad de los recursos hídricos en México y el Mundo, la localización y descripción del área de estudio, las características climatológicas, cobertura vegetal y de tipos de suelo de la misma, así como una breve reseña histórica del desarrollo de la ciudad de Linares.

**3. Marco Geológico** Contiene una revisión paleogeográfica y estratigráfica del noreste de México, se realizó el análisis de la geología regional correlacionada con la geología local del área de estudio, donde se incluye la descripción geológica y litológica, un análisis de la geología estructural y la elaboración del mapa digital geológico–estructural (cartografía digital en un SIG desarrollado en ArcGIS).

**4. Marco Hidrológico de la Cuenca del Río Pablillo** Se describen las características de la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo y de los principales cursos superficiales de agua tributarios al río Pablillo, así como las características geomorfológicas de la cuenca, se realiza un análisis de datos

climatológicos como precipitación, temperatura, evaporación y evapotranspiración, así como la hidrometría de los cauces principales. Se describen las demandas de agua y finalmente se comenta la importancia de la Presa José López Portillo - Cerro Prieto.

**5. Caracterización Hidrogeológica e Hidrogeoquímica del Agua Subterránea** Trata del estudio de la hidroestratigrafía, de la caracterización de acuíferos, del régimen hidrogeológico, de la recarga, del comportamiento del nivel freático que permiten determinar el comportamiento hidrogeológico en el área de estudio. También se describen los métodos de muestreo y de los resultados de los análisis de las muestras, así como de la calidad y caracterización del agua subterránea, al interior del área considerada en la investigación.

**6. Vulnerabilidad de acuíferos y áreas de riesgo a la contaminación** Es una síntesis que incluye la vulnerabilidad acuífera evaluada por medio de la aplicación del método DRASTIC sobre la base digital de datos en ambiente SIG. Se presenta una optimización al método por medio de la cual se introduce el Uso de Suelo como parámetro para evaluar el riesgo a la contaminación y la validación de mapas por medio del análisis del contenido de Nitratos en el agua subterránea. Con ambos parámetros se desarrolló un procedimiento para identificar áreas prioritarias a ser protegidas.

**7. Hidrogeología Urbana** Se detalla un análisis de la situación de los problemas concernientes al agua subterránea en medios urbanos, se denota la importancia de esta nueva rama dentro de las Ciencias Hidrogeológicas denominada "Hidrogeología Urbana". Posteriormente, se analiza la situación de la ciudad de Linares y su área peri-urbana. Este capítulo tiene como objetivo el cimentar la necesidad y el campo de acción de esta nueva rama del conocimiento hidrogeológico general.

**8. Planificación territorial hidrogeológicamente estratégica** Trata de la revisión de los parámetros básicos para una planificación estratégica, se realizó la categorización de los datos, condiciones y requisitos de la planificación estratégica. Se integro la Evaluación de Criterios Múltiples de Decisión a una plataforma SIG. Los escenarios propuestos, los resultados, la validez y aplicabilidad del sistema de planificación territorial propuesta también se detallan en este capítulo.

**9. Conclusiones generales** Se puntualizan las conclusiones generales del trabajo de investigación.

**10. Referencias** Presenta el listado de la bibliografía revisada.

## 1.6 APORTACIÓN CIENTÍFICA

Verificar la factibilidad y conocer la importancia de la introducción de parámetros geológicos, hidrogeológicos, de calidad y cantidad de agua subterránea y de vulnerabilidad de acuíferos para la asignación del uso de suelo en los planes de desarrollo municipal para ciudades intermedias con baja disponibilidad de datos técnico-administrativos.

## 1.7 ARTÍCULOS Y PONENCIAS EN SEMINARIOS RELACIONADOS AL DESARROLLO DE LA TESIS

Simultáneamente al avance de la tesis, se desarrollaron actividades científico - académicas, que son sin duda importantes complementos a la información contenida en este documento, dichas diligencias se detallan a continuación.

### 1.7.1 Descripción de las publicaciones científicas

Se describen a continuación los artículos científicos propuestos que fueron desarrollados paralelamente al avance de la tesis:

**1) *Validation of DRASTIC maps applying GIS technology and Nitrate contents over the last 28 years in the Northeast portion of Pablillo River Basin (Linares, N.L., Mexico).***

**Revista:** *Hydrogeology Journal*

**Autores:** *Dávila-Pórcel René-Alberto, De León-Gómez Héctor, Schüth Christoph, Hoppe Andreas, Lehné Rouwen*

Los principales objetivos que tiene este documento son: a) Evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, b) Determinar el riesgo a la contaminación potencial producida por el uso de suelos e c) Identificar áreas de riesgo prioritarias al interior del área de estudio, todo el análisis fue desarrollado en un ambiente SIG totalmente digital.

**2) *Hydrochemical and hydrogeology evolution of groundwater in shallow aquifers, Linares-Nuevo León, Mexico.***

**Revista:** *Environmental Geology*

**Autores:** *Dávila-Pórcel René-Alberto, De León-Gómez Héctor, Schüth Christoph*

Se realizó la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea en el periodo comprendido entre 1981 y 2009, con el objeto de evidenciar la evolución química natural y la posible presencia de contaminantes como producto de las actividades humanas desarrolladas en las Ciudades de Linares y Hualahuises y las áreas de cultivo circundantes a las mismas.

**3) *Groundwater quality analysis through GIS maps in Linares region (north-east Mexico).***

**Revista:** *Tecnología y Ciencias del Agua*

**Autores:** *Dávila-Pórcel René-Alberto, Schüth Christoph, De León-Gómez Héctor*

Se analizó la hidrogeoquímica de las muestras correspondientes a las gestiones 2008 y 2009, por medio de la química de iones mayores combinados con el uso de SIG. Permitiendo un análisis espacial de la distribución e interacción con el medio geológico de cada uno de los iones.

**4) *Hidrogeología Urbana; una nueva herramienta útil para el desarrollo sostenible urbano.***

**Revista:** *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*

**Autores:** *Dávila-Pórcel René-Alberto, De León-Gómez Héctor*

Se describe el campo de conocimiento, problemática de análisis, la modificación de los mecanismos hidrodinámicos del agua subterránea bajo áreas urbanas, los procesos de contaminación y las consecuencias de la sobreexplotación de acuíferos, así como las herramientas de gestión con fines de alcanzar un desarrollo sostenible.

### **1.7.2 Ponencias en congresos y seminarios internacionales**

Complementariamente, se participó en los siguientes congresos, dichas actividades están relacionadas con la investigación y se listan a continuación:

- 1) LATEIN-AMERIKA KOLLOQUIUM**, Organizado por la Georg Gustav Universität, Göttingen, Alemania, abril de 2009. "Hydrogeology and Hydrochemistry of groundwater in the Pablillo River Basin Linares, Nuevo Leon, Mexico".

**Autores:** René Alberto Dávila Pórcel, Héctor De León Gómez, Fernando Velasco Tapia, Andreas Hoppe y Christoph Schüth.

**2) XII CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO**, Organizado por la Universidad de Chile, Santiago de Chile, noviembre de 2009. Presentación oral “Hidrogeoquímica e Hidrogeología de la Cuenca del Río Pabllillo, Linares, México”.

**Autores:** René Alberto Dávila Pórcel, Héctor De León Gómez.

**3) XV CONGRESO PERUANO DE GEOLOGÍA**, Organizado por la Sociedad Geológica del Perú, Cusco, Perú septiembre-octubre 2010. Presentación oral “Evaluación de la vulnerabilidad acuífera por el Método DRASTIC en la cuenca del río Pabllillo, Linares, Nuevo León, México”.

**Autores:** René Alberto Dávila Pórcel, Héctor De León Gómez, Andreas Hoppe y Christoph Schüth.

**4) REUNIÓN ANUAL 2010 DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA**, Noviembre 2010. Presentación oral “Evaluación de la vulnerabilidad acuífera (Método DRASTIC) e hidrogeoquímica del agua subterránea en la cuenca del río Pabllillo, Linares, México”.

**Autores:** René Alberto Dávila Pórcel, Héctor De León Gómez, Andreas Hoppe y Christoph Schüth.

**5) LATEIN-AMERIKA KOLLOQUIUM 2011**, Rupprecht-Karls-Universität Heidelberg, Heidelberg, Alemania, marzo-abril de 2011. Presentación oral “Groundwater vulnerability as a tool for urban hydrogeology analysis”.

**Autores:** René-Alberto Dávila-Pórcel, Héctor De León-Gómez, Christoph Schüth y Andreas Hoppe.

**6) GEO-NETWORK OF LATINAMERICAN-GERMANI ALUMNI**, Rupprecht-Karls-Universität Heidelberg, Alemania, Abril 2011. Presentación oral “Multicriteria evaluation to reach sustainable land-use in urban environments including hydrogeological parameters, Linares example”.

**Autores:** René Alberto Dávila Pórcel, Héctor De León Gómez, Andreas Hoppe y Christoph Schüth.

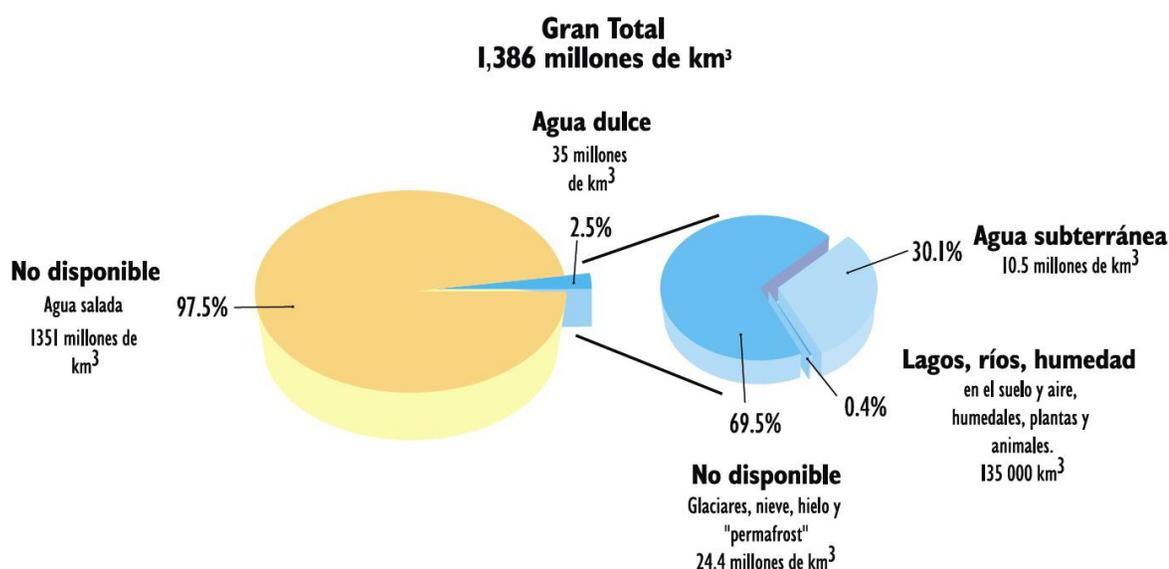
## 2. GENERALIDADES

### 2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo condensa la situación de los recursos hídricos a escala mundial, el agua subterránea en el mundo, la relación estrecha entre agua, población y desarrollo. De manera más regional, se reporta la realidad y tendencias de explotación del recurso hídrico en México y finalmente se detalla el área de estudio, las hipótesis asumidas para la investigación, una breve descripción de los SIG y los lineamientos generales para una planificación territorial.

### 2.2 ACTUALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL MUNDO

El agua es un recurso esencial en diversos ámbitos, principalmente en temas sociales y económicos. Su importancia es cada vez mayor, convirtiéndose actualmente en uno de los factores críticos más trascendentales del desarrollo mundial. Es por ello, que las previsiones a futuro la catalogan como el problema ambiental más decisivo a corto plazo que deberá ser enfrentado por millones de personas (CNA, 2007b; INEGI, 1997).



**Figura 2.1** Distribución Global de Agua en el Mundo (**Fuente:** Conagua, The Water Atlas, 2004)

En la Figura 2.1 se muestra el cálculo realizado por las Naciones Unidas, la disponibilidad de agua dulce en el mundo solamente es el 2.5% del volumen total en el planeta Tierra, de manera alarmante, se indica que la disponibilidad de agua por habitante descenderá de 7,300 m<sup>3</sup> en 1995 a 4,800 m<sup>3</sup> en el año 2025 representando un ~34.25%. Las aguas subterráneas significan un 30.10% de las aguas dulces (10.5 millones de km<sup>3</sup>), constituyéndose en la principal fuente de agua disponible para consumo y uso humano como se muestra en la Figuras. 2.1 y 2.2 (CNA, 2007b; Tarbuck y Lutgens, 2005; UNESCO, 2003).

Las extracciones de agua subterránea a nivel mundial alcanzan un total anual de 600 a 700 Km<sup>3</sup>/año en el año 2000. Más del 25 % de la población mundial depende del agua subterránea para subsistir. Se estima que cada habitante requiere un total diario de 37.5 litros (Clarke y King, 2004; Cole, 1998; Younger, 2007).

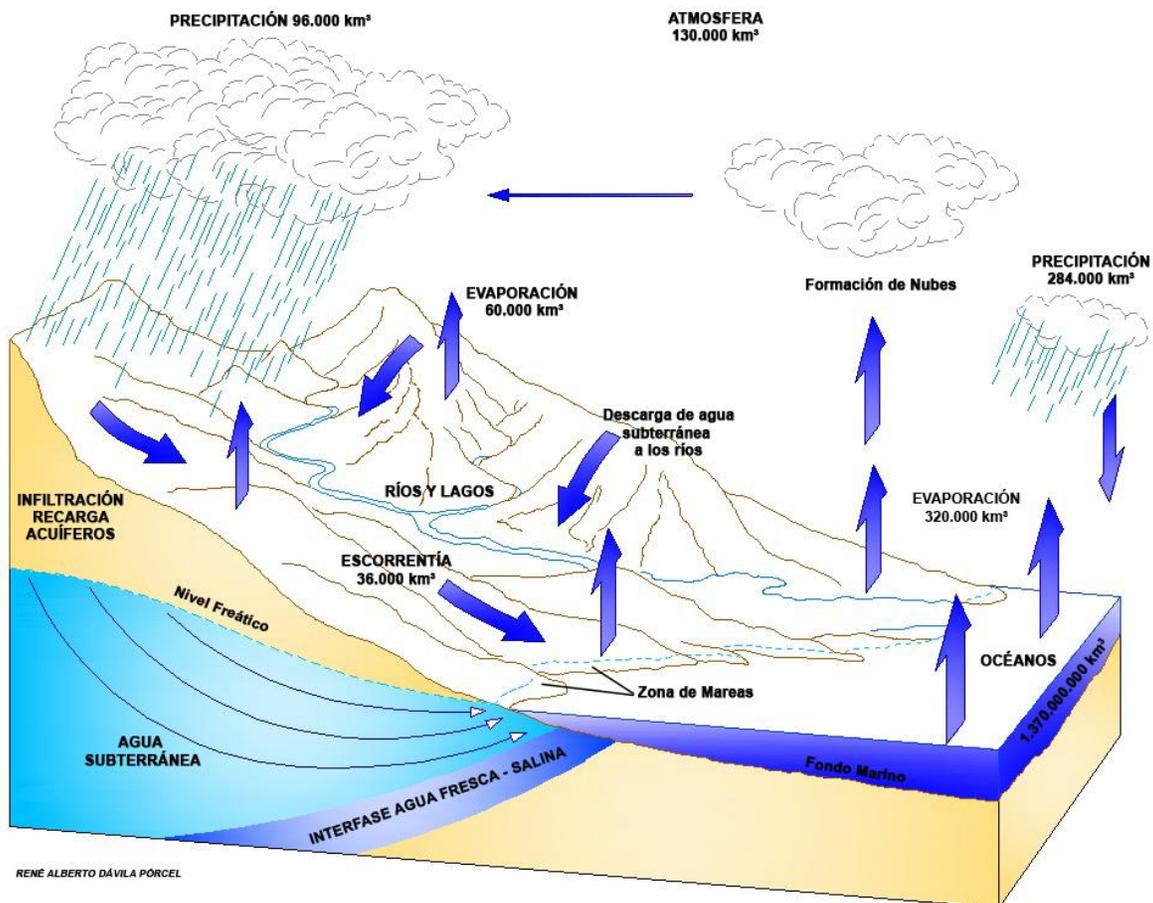
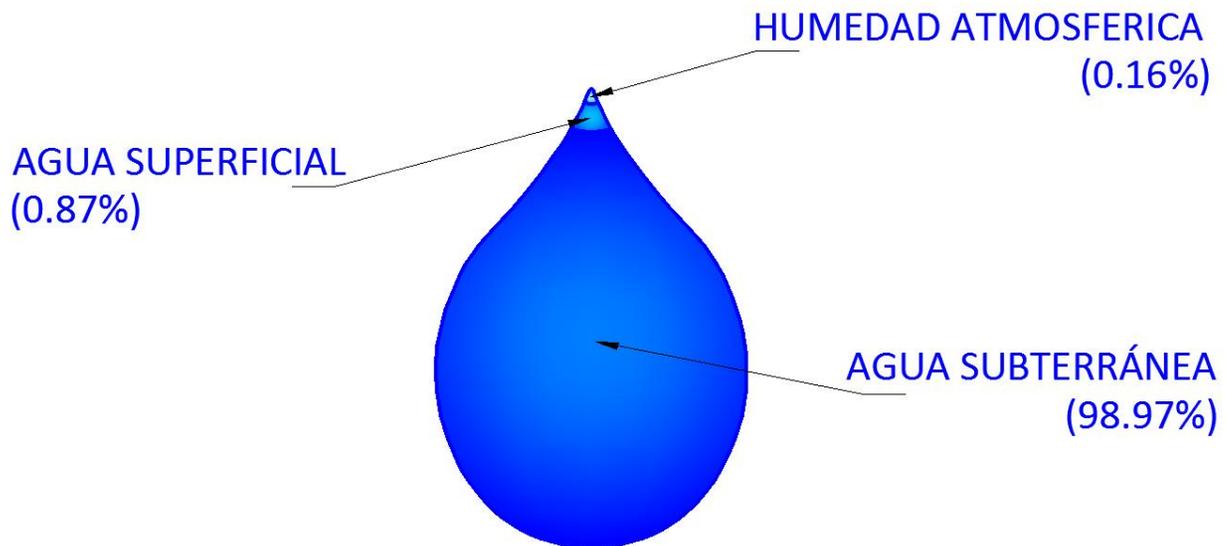


Figura 2.2 Ciclo Global del Agua;

Fuente: Modificado de Younger (2007); actualizado de Tarbuck y Lutgens (2005) y de Hiscock (2005).

### 2.3 AGUA SUBTERRÁNEA, POBLACIÓN Y DESARROLLO SOSTENIBLE

El agua subterránea es un importante recurso natural. A nivel mundial más de 2 mil millones de personas dependen del agua subterránea para su abastecimiento diario. Una gran parte de la agricultura y la irrigación mundial depende del agua subterránea, así como un gran número de industrias (Hiscock, 2005; Kemper, 2004).



**Figura 2.3** Fuentes de Agua Dulce en el Mundo; **Fuente:** Modificado de Herschy (1998).

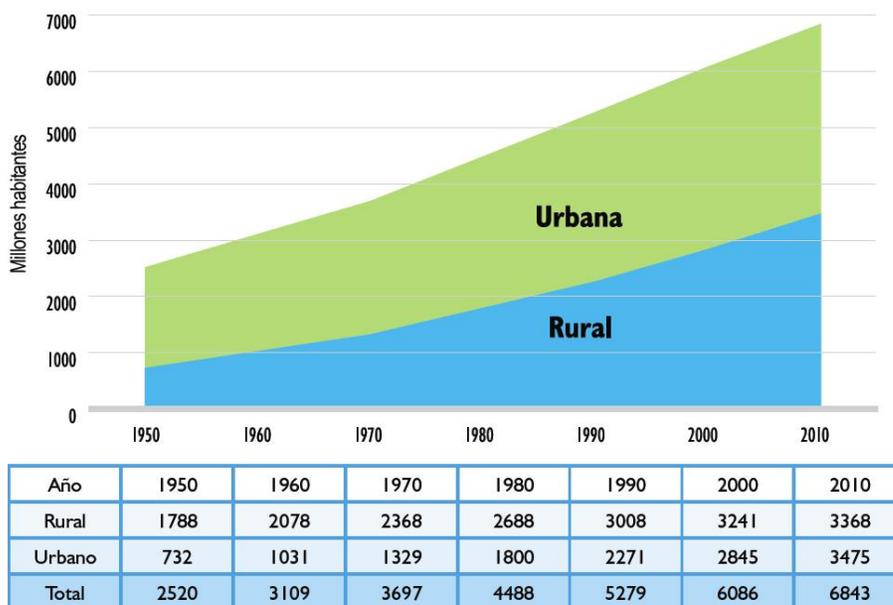
El mayor volumen de agua dulce, que es disponible para consumo humano y aprovechamiento con fines industriales, agrícolas y municipales se encuentra en el subsuelo. La Figura 2.3 presenta los porcentajes del total de agua dulce disponible en el mundo.

El agua para consumo humano es un recurso limitado, prueba de ello es que para el año 1995 se reportó que 2 millones de habitantes sufren escases de agua. Para el año 2000 aproximadamente 700 millones de habitantes no contaban con agua potable, además 1,100 millones de habitantes en el mundo carecieron de abastecimiento de agua seguro (Drangert y Cronin, 2004; Godfrey y Smith, 2005; INEGI, 1997; WHO y UNICEF, 2000).

La concentración de humanos en las ciudades complica el escenario hídrico, Hirata *et al.*, (2006) reportan que 12 de 23 mega - ciudades (metrópolis con más de 10 millones de habitantes) utilizan agua subterránea como importante componente de sus sistemas de abastecimiento urbano. Aproximadamente 1.5 a 2.8 mil millones de personas en el mundo son abastecidas con agua subterránea (Hirata *et al.*, 2006).

La Figura 2.4, muestra el crecimiento poblacional en las últimas seis décadas, donde el rasgo principal es que en 2010 se superará el doble del total de la población mundial que se registró en el año 1950.

Los procesos de urbanización, el agotamiento y la sobreexplotación de recursos hídricos en ambientes urbanos, son la consecuencia directa del crecimiento poblacional (Figuras 2.4; 2.5), por tal razón, muchas ciudades deberán hacer frente a complejos problemas ambientales relacionados con la cantidad y la calidad del agua (Sánchez-Villa, 2004; Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).



**Figura 2.4** Comportamiento de la población por sectores urbano y rural de 1950 al 2010. Tomado de CNA (2007), generada por Conagua, Subdirección General de Programación. Elaborado a partir de datos de UNDESA. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. Junio de 2007

La expansión urbana, provoca que se viertan volúmenes cada vez mayores de aguas residuales urbanas hacia ríos, lagos y subsuelo, comprometiendo de esta forma la salud pública de los habitantes de las ciudades y sus alrededores (Figura 2.6). Este complejo escenario justifica los estudios de hidrogeología en zonas urbanas, debido a la fuerte interacción entre las aguas subterráneas y el desarrollo socioeconómico de las ciudades

Una clara evidencia de la relación agua subterránea-desarrollo sostenible, es el caso de la ciudad de Eritrea (África oriental) donde se presentó una progresiva eutrofización de los ríos y lagos como resultado de la contaminación urbana. Debido a ello, se tuvo que restringir la expansión física de la ciudad en las zonas donde se debe proteger las fuentes de aguas superficiales y subterráneas (Klimas, 1995).



**Figura 2.5** Ejemplo de concentración poblacional en centros urbanos

A nivel mundial, los gobiernos municipales, instituciones gubernamentales, investigadores y planificadores urbanos, deben afrontar problemas ambientales referidos al recurso agua. Para la gestión integral de recursos hídricos debe incluirse criterios de optimización, implementando políticas de identificación de riesgos, protección, ahorro y reutilización acordes a los problemas particulares de cada caso (Sánchez-Villa, 2004).



**Figura 2.6** Vertido de aguas residuales a ríos (Fuente: <http://bernabelen.wordpress.com/>)

En resumen, existe una explosión demográfica en el mundo, lo cual demanda mayores volúmenes de recursos hídricos y expansión rápida de áreas urbanas, ambos procesos derivan en mayores afectaciones al medio ambiente, comprometiendo el desarrollo sostenible de ciudades, generando graves problemas de salud en los humanos de muchas ciudades del orbe.

## 2.4 SITUACIÓN HÍDRICA DE MÉXICO

México no es la excepción de las tendencias mundiales en temas de crecimiento poblacional, tal es así, que la población urbana en México experimentó un crecimiento sorprendente entre los años 1900 y 2005. En 1950 se registraron ~25 millones de habitantes, para el año 2005 se tienen ~103 millones de personas, lo que significa un crecimiento de aproximadamente 4 veces en solo 55 años. La Tabla 2.1 muestra el incremento poblacional en México (CNA, 2007b; INEGI, 2005).

**Tabla 2.1** Incremento Poblacional de México entre 1950 al 2005 (millones de habitantes)

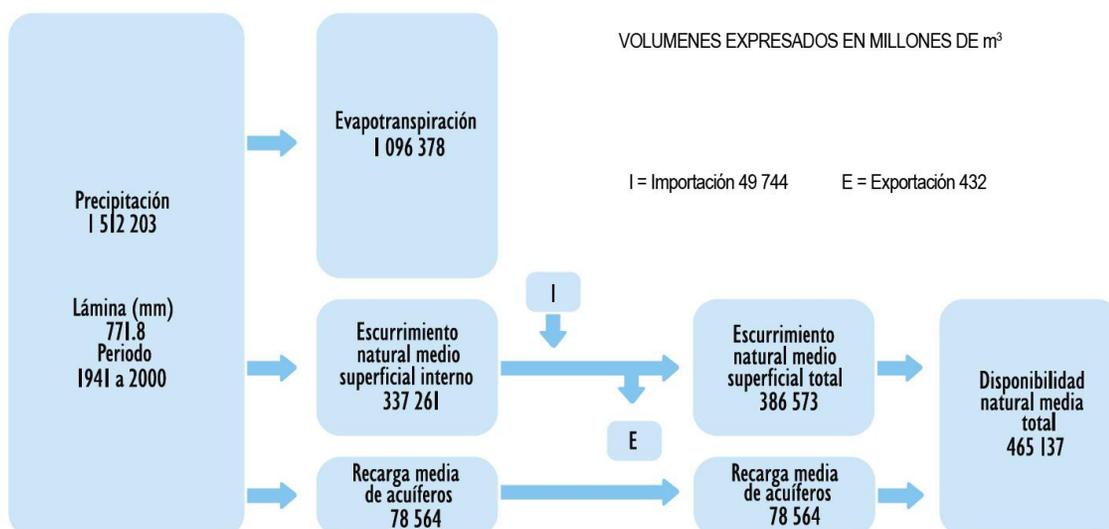
AÑO	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
RURAL	14.80	17.23	18.58	19.93	21.24	22.55	22.93	23.30	23.73	24.16	24.71	24.28
URBANA	11.02	17.76	23.10	28.43	36.45	44.47	51.34	58.21	62.73	67.25	72.98	79.20
<b>TOTAL</b>	<b>25.82</b>	<b>34.99</b>	<b>41.68</b>	<b>48.36</b>	<b>57.69</b>	<b>67.02</b>	<b>74.27</b>	<b>81.51</b>	<b>86.46</b>	<b>91.41</b>	<b>97.69</b>	<b>103.48</b>

**Fuente.-** Elaboración propia a partir de datos de CNA (2007).

A escala estatal, en el Estado de Nuevo León se registró un crecimiento de la población de ~3.8 a ~4.2 millones de habitantes durante el lustro anterior (2000 - 2005). Esta situación de ascenso poblacional también se evidenció en el Municipio de Linares, donde la población se incrementó más de un 10% entre 1990 (~61 mil habitantes) y 2005 (~71 mil habitantes). Por ser Linares el municipio más importante fuera del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), experimentó y experimenta un crecimiento poblacional e industrial constante y acelerado (De León-Gómez *et al.*, 1998; HAL, 2009; INEGI, 2005).

Los recursos de agua dulce de México lo ubican como uno de los países con riqueza media del recurso, con una disponibilidad anual per cápita de 474.9 km<sup>3</sup>, volumen del cual 411.9 km<sup>3</sup> son de escurrimiento superficial y 63 km<sup>3</sup> son los que alimentan los acuíferos (Figura 2.7). México posee 314 cuencas hidrológicas, agrupadas en 37 regiones hidrológicas para su administración mostradas en la Figura 2.8 (CNA, 2007b).

A nivel regional, México es el país que explota más cantidad de agua del total de la disponibilidad bruta anual, con el 37%, Estados Unidos de América explota ~19% y Canadá un 2%, valores que representan altas demandas hídricas en México (INEGI, 1997).



**Figura 2.7** Valores Medios Anuales del Ciclo Hidrológico en México; **Fuente:** Modificado de (CNA, 2007b)

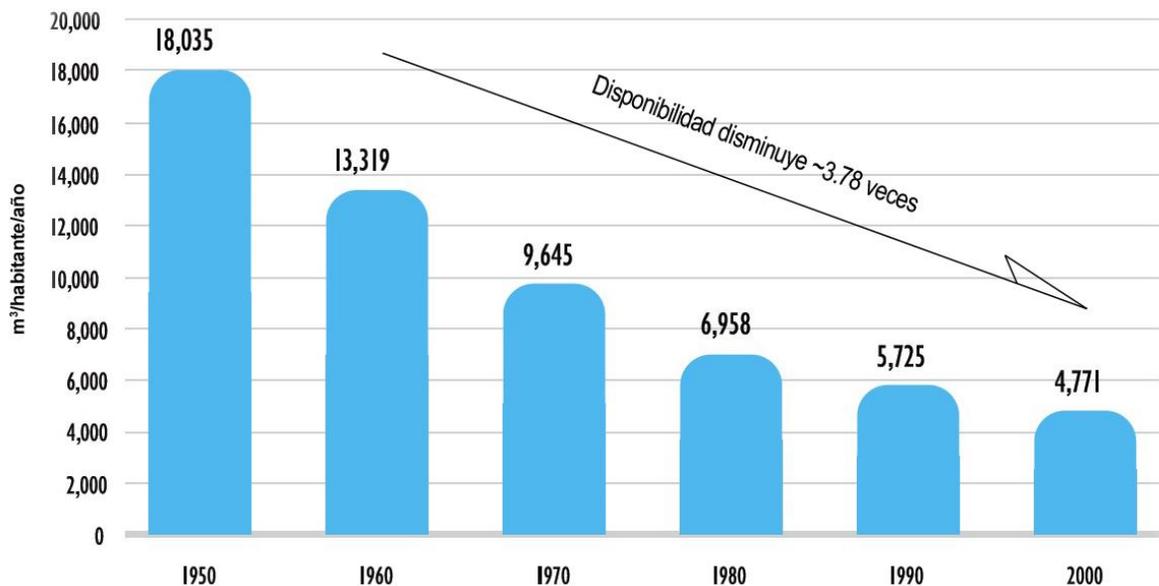
A nivel mundial, México ocupa el décimo lugar en extracción de agua destinadas a usos consuntivos con un volumen anual de 74.7 km<sup>3</sup>/año, ésta cantidad se distribuye en: agricultura (76.00%), uso doméstico (14.10%) e industrial (9.90%), (CNA, 2007b).



**Figura 2.8** Regiones Hidrológicas de México; **Fuente:** (CNA, 2007b)

De todo el volumen extraído, el agua subterránea aporta en promedio 25.1 km<sup>3</sup>/año representando una explotación de 275.4 m<sup>3</sup>/año por cada habitante. Los usos del volumen extraído del subsuelo son destinados a: agricultura (64%), industrial (23%) y uso doméstico (13%), (CNA, 2007b; INEGI, 1997; Younger, 2007).

Los datos de disponibilidad del recurso indican que en promedio cada mexicano dispone de 4,771 m<sup>3</sup>/año, suponiendo cerca del doble del agua que dispone un Europeo y ~170 veces más que un egipcio (Figura 2.9). Esta disponibilidad sufrió variaciones considerables en las últimas seis décadas, reduciendo su reserva en ~3.78 veces en solo 50 años.



**Figura 2.9** Disponibilidad Natural de Agua Per Cápita entre 1950-2000 [m<sup>3</sup>/hab/año] **Fuente:** Modificado de (CNA, 2007b) e (INEGI, 2005).

Los usos del agua se dividen en dos grandes grupos: a) usos consuntivos (impacta la disponibilidad al aprovechar el agua) y b) usos no consuntivos (retornan la totalidad del agua aprovechada). Para el año 1995, la distribución de extracciones para usos consuntivos era: agrícola, doméstico, industrial y acuicultura con 61.2, 8.5, 2.5 y 1.3 km<sup>3</sup>/año respectivamente, haciendo un total de 186.7 km<sup>3</sup>/año (CNA, 1994; CNA, 2007b) .

En México, el agua subterránea es extraída de 459 acuíferos, administrados por trece regiones Hidrológico-Administrativas (Figura 2.10). Con excepción de los acuíferos del sureste del país, el resto tiene déficit en su balance hídrico, donde las extracciones superan la recarga (CNA, 2007b).

En el año 1994, se evidenció que el noreste de México tenía una recarga estimada de 1.65 km<sup>3</sup>/año y una extracción de 1.45 km<sup>3</sup>/año resultando una disponibilidad hídrica de 0.20 km<sup>3</sup>/año (INEGI, 1997).



**Figura 2.10** Delimitación de Acuíferos por región Hidrológico-Administrativa; **Fuente:** (CNA, 2007b)

La región VI tiene por nombre Río Bravo, la cual tiene una disponibilidad media total de 11,938 hm<sup>3</sup>/año, en su interior vive una población de 10.56 millones de personas por tanto la disponibilidad per cápita es de ~1,131 m<sup>3</sup>/hab/año. Por otra parte, los cursos superficiales de agua tienen un escurrimiento total de 6,857 hm<sup>3</sup>/año y la recarga media anual de los acuíferos de la zona asciende a 5,081 hm<sup>3</sup>/año. La región VI tiene 100 acuíferos de los cuales 16 se encuentran sobreexplotados (CNA, 2007b).

Una consecuencia del aprovechamiento desmesurado de las fuentes hídricas es la sobreexplotación de acuíferos (Tabla 2.2). Las regiones más afectadas son el Norte del país y el Valle de México. Las cifras regionales indican un déficit considerable en los estados de Baja California, Sonora, Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí.

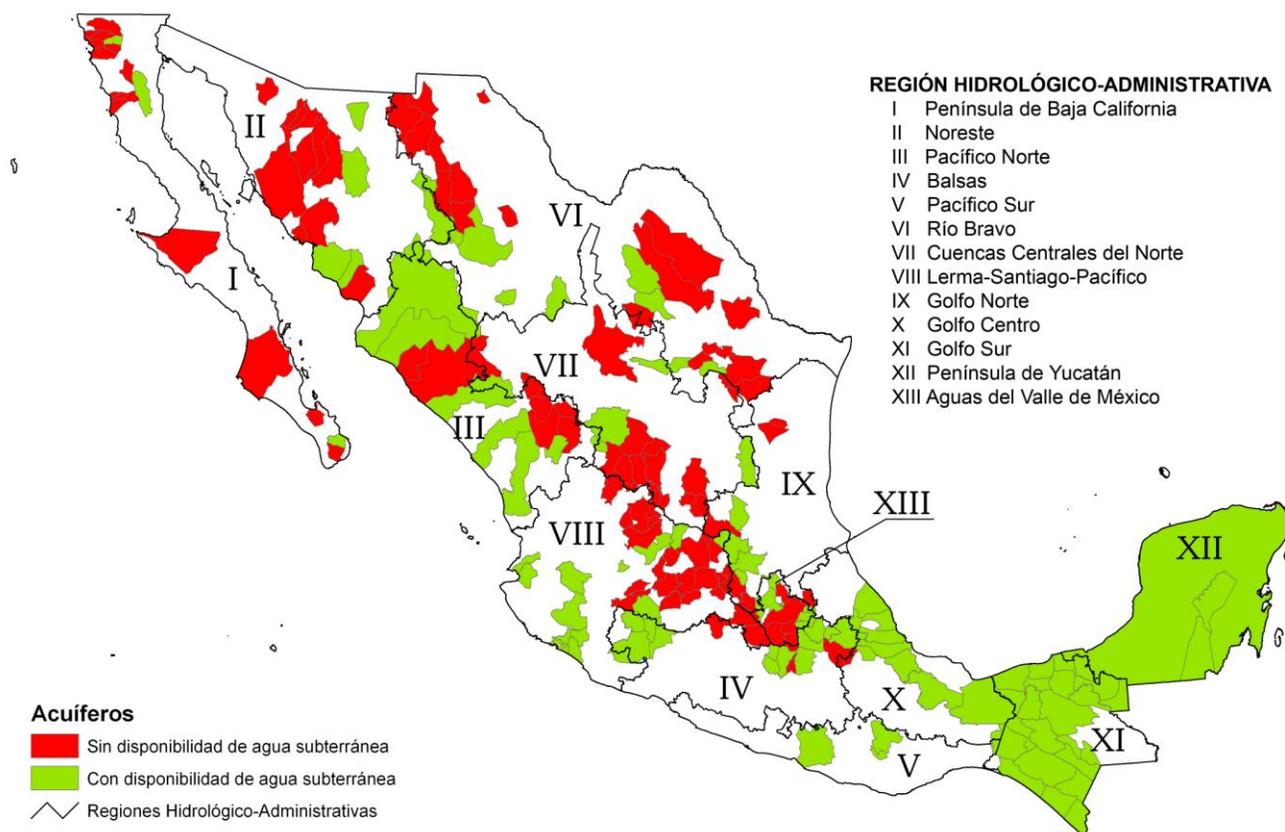
La Tabla 2.2 muestra el incremento de los acuíferos sobreexplotados entre 1975 al 2005, en solo treinta años los acuíferos sobreexplotados en México se triplicaron.

**Tabla 2.2** Incremento de la sobreexplotación de acuíferos en México

Año	Acuíferos sobreexplotados en México
1975	32
1981	36
1985	80
2001	97
2003	102
2005	104

**Fuente.-** Elaboración propia a partir de datos de CNA (2007)

La Figura 2.11, muestra las áreas acuíferas más deprimidas que no tienen disponibilidad de reserva y los acuíferos que tienen disponibilidad de agua suficiente para su explotación sin mayores problemas.



**Figura 2.11** Disponibilidad de agua subterránea en México; **Fuente:** (CNA, 2007b)

---

## 2.5 GEOGRAFÍA FÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las principales vías de comunicación del área de estudio son por vía terrestre. La carretera federal Nro. 85 une las capitales de los Estados de Nuevo León en el norte (Monterrey) y Tamaulipas hacia el sur (Ciudad Victoria), sobre el km 127 desde el Área Metropolitana de Monterrey se ubica la ciudad de Linares.

Otra vía importante de comunicación es la carretera estatal Nro. 58, la cual en su dirección hacia el oeste de Linares la vincula con los municipios y las ciudades de Iturbide y Galeana, que pertenecen al Estado de Nuevo León. De manera más local, la vinculación del centro urbano con las comunidades vecinas se realiza por medio de carreteras de terracería en su gran mayoría y un par de ellas pavimentadas (carretera a la Presa Cerro-Prieto).

### 2.5.1 Localización

El área de estudio se localiza en el Estado de Nuevo León, al sur-este del AMM en el noreste de México. Físicamente, se ubica dentro de la Región Hidrológica “San Fernando – Soto la Marina” (región hidrológica 25), que abarca 54,961 km<sup>2</sup>, presenta una precipitación anual promedio de 731.3 mm y tiene 39 cuencas en su interior.

La CHRP es una de las cuencas que está situada sobre parte los territorios de los municipios de Linares, Hualahuises e Iturbide enmarcada dentro de las coordenadas 14408824E; 2724370N (vértice inferior izquierdo) y 14469522E; 2761290N (esquina superior derecha). Su perímetro mide 256.61 km y tiene una superficie de 1734.55 km<sup>2</sup> (Figura 2.12). En su interior se encuentran localizadas las Ciudades de Linares, Hualahuises e Iturbide, además de varios asentamientos humanos aleatoriamente distribuidos (De León-Gómez, 1993; Rodríguez de Barbarín y Barbarín-Castillo, 1993).

### 2.5.2 Clima

El noreste de México presenta clima semi-árido subtropical, registrando una temperatura media anual de 22°C, pero se caracteriza por tener veranos muy calurosos e inviernos fríos. La precipitación media anual es ~800 mm, pero dentro de la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental las precipitaciones alcanzan 900 a 1,100 mm como promedio anual, que cae entre los meses de Mayo a Octubre representando un 80% del volumen total precipitado (INEGI, 1981; INEGI, 2005).

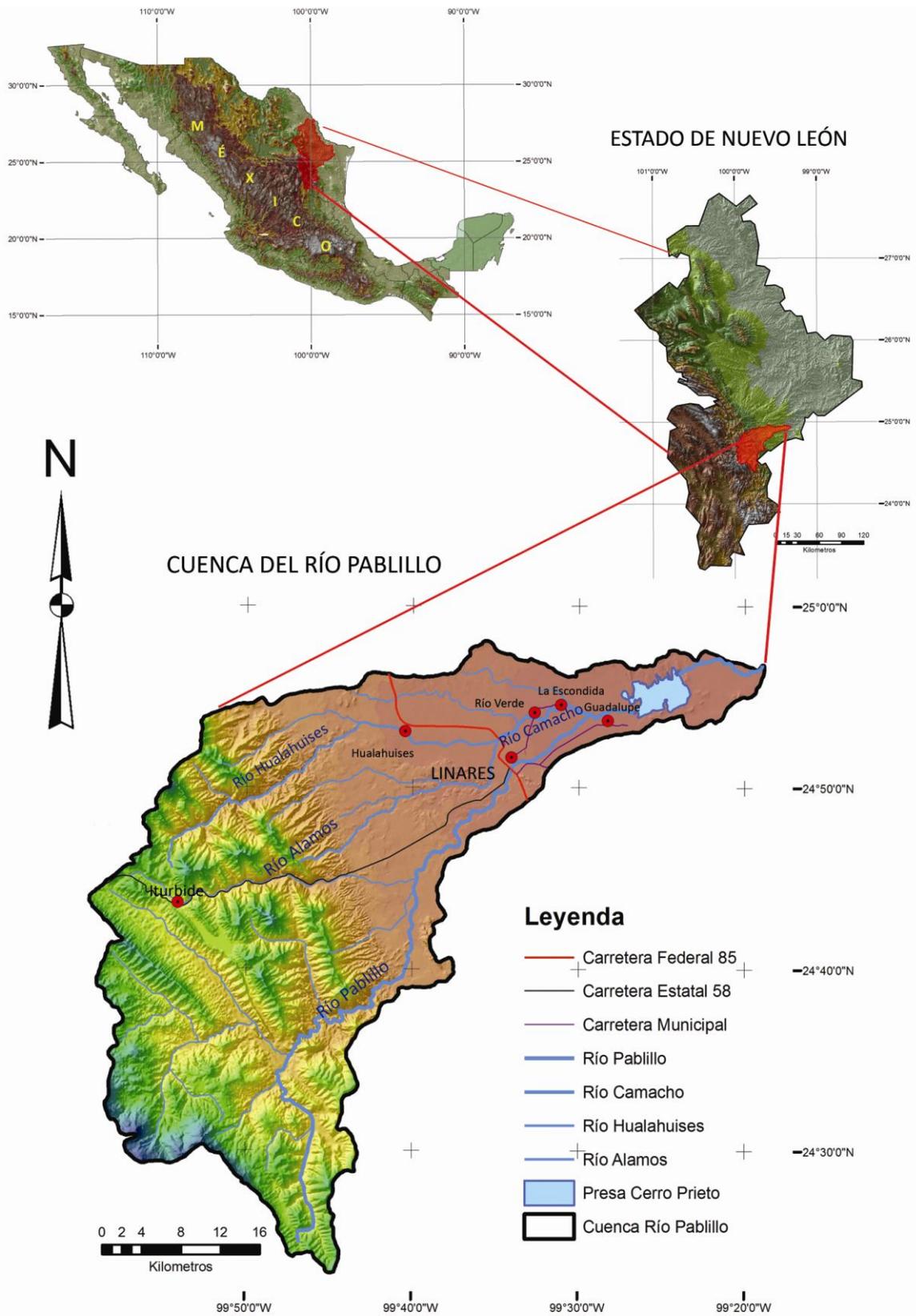


Figura 2.12 Localización del área de estudio

### 2.5.3 Suelos y Vegetación

Los suelos predominantes en el este de la CHRP son: vertisoles en mayor cantidad, regosoles, luvisoles, feozems, litosoles y rendzinas. En el sector oeste de la cuenca cerca de la comunidad Pablillo se encuentran feozem y castañozem. Los valles de Santa Rosa e Iturbide están cubiertos por rendzinas y en el frente de la SMO se presentan regosoles y luvisoles (Reyes-Reyna, 2000).

La vegetación predominante en la zona es matorral tamaulipeco que se presenta en subprovincias de llanuras y lomeríos (clima árido). Al interior de la SMO sobre las laderas, se puede observar una vegetación de tipo matorral submontano, matorral desértico rosetófilico submontano y chaparral, ya en las cotas más altas se observan pinos y encinos (INEGI, 1981).

### 2.5.4 Hidrología

Los límites de la CHRP son: al sur la sub-cuenca del río Soto La Marina, al oeste la cuenca de río Salado, al norte la sub-cuenca del río Potosí y al este la cuenca del río Conchos, los dos últimos son parte de la región hidrológica 25 (San Fernando Soto – La Marina), (INEGI, 1983b).

El cauce principal de la cuenca es el río Pablillo que nace entre los cerros Pablillo e Infiernillo (3,167 m.s.n.m.) su dirección principal de flujo es suroeste-noreste, el patrón de drenaje es de tipo rectangular enrejado en el área de la Sierra Madre Oriental desembocando en la Presa José López Portillo (Cerro-Prieto), después de atravesar la ciudad de Linares.

Los afluentes al río Pablillo son el río Hualahuises y río Camachito que se unen debajo del puente sobre la Carretera Federal 85 al ingreso de la ciudad de Linares para formar el río Camacho, el cual se extiende hasta unirse con el río Pablillo antes de que esté desemboque en la Presa José López Portillo (Cerro-Prieto).

El acuífero en el área de estudio, recibe el nombre de Citrícola Sur (debido a la importante actividad citrícola de la zona) él cual tiene una recarga media anual de  $75.1 \text{ hm}^3$ , un volumen consignado de explotación igual a  $28.0 \text{ hm}^3$  y tiene una disponibilidad media anual de  $-29.1 \text{ hm}^3$ , considerándose como una zona de veda, según datos publicados en el diario oficial de la federación en fecha 31 de enero de 2003 (CNA, 2007b).

La CHRP, es administrada hídricamente por la región VI Río Bravo (Fig 2.10), que aglutina una población total de 10,295,932 habitantes para el 2005, de la cual la población urbana es de 9,620,891 hab., en el área rural viven 675,041 hab., distribuidos en un total de 141 municipios. La región VI registró una precipitación anual promedio de 416.4 mm (1941-2000) y una disponibilidad

per cápita de 1,131 m<sup>3</sup>/hab/año. Los volúmenes explotados de agua subterránea para los principales usos son: a) agricultura con 3,445 hm<sup>3</sup>, b) el abastecimiento público consume 633 hm<sup>3</sup>, c) el uso industrial requiere un gasto de 188 hm<sup>3</sup> y d) las termoeléctricas aprovechan 62 hm<sup>3</sup>. El total de los mismos alcanza 4,329 hm<sup>3</sup> representando un 47.5% del agua total explotada (CNA, 2007b).

## 2.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Por muchos años los Sistemas de Información Geográfica han sido considerados como muy complejos, extremadamente caros y de propiedad reservada. El desarrollo de hardware y software en una interface amigable, poderosa y asequible permitió que emergieran al público con la tecnología del internet. Como consecuencia los SIG llegaron a ser ampliamente utilizados en temas como: gestión de recursos naturales, estudios ambientales, análisis y planificación de recursos hídricos, planificación urbana y regional, gestión de desastres naturales, estudios de tráfico y planificación de transporte, gestión y planificación de negocios, entre muchos otros (Khan y Hassan, 2009).

Su desarrollo se debe a las innovaciones tecnológicas de hardware y software, su mayor importancia es que la geografía forma parte de nuestro mundo cotidiano donde la mayoría de las decisiones que tomamos están influenciadas por un hecho geográfico (Gallego *et al.*, 2006).

El empleo cada vez más generalizado de las computadoras, junto a la continua innovación en el campo de la informática fueron la base de partida inicial para examinar las posibilidades de aplicación en el campo de la cartografía y áreas conexas (Gómez-Piñeiro, 1992).

Ahora, los Sistemas de Información Geográfica emergen como un importante campo en el estudio académico, uno de los sectores que crece más rápidamente en la industria computacional y aun mas importante, es un componente esencial de la información tecnológica dentro de la estructura de la sociedad moderna (Khan y Hassan, 2009).

Los Sistemas de Información Geográfica datan de hace casi 50 años, concretamente el año 1962, fecha en la que fue diseñado en Canadá el primer sistema de estas características con objeto de inventariar los recursos naturales existentes a escala nacional (Tolimson, 1984).

A partir de esta fecha diferentes eventos y actividades fueron desarrollados para alcanzar las características y capacidades que actualmente poseen estos sistemas, las más importantes vienen nombradas en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Cronología de la Evolución de los SIG en relación a los eventos formativos previos en Tecnología y otros contextos

Año	SIG	Contexto
1963	Sistema de Información Geográfica de Canadá	
1964	Laboratorio de Harvard para Gráficos computarizados y Análisis Espacial	Especificación del sistema GPS
1966	SYMAP	WGS-66
1967	Oficina de Censos DIME de Estados Unidos	
1968		Base de datos relacional definida por Codd
1969	ESRI, Intergraph, Laser-Scan founded	
1970	Acrónimo GIS nace en la conferencia IGU/UNESCO	Circuitos integrados
1971		ERTS/Landsat 1 se puso en marcha
1973	Ordnance Survey inicia la digitalización, Reino Unido	
1974	Serie de conferencias de AutoCarto; Computadores y Geociencias	UNIX
1975		C++; SQL
1978	ERDAS founded	Primer satélite GPS puesto en marcha
1980	FEMA se integra al USGS 1:2 mapeo sin fisuras en base de datos	
1981	Computers, Environment & Urban Systems Arc/Info se pone en marcha	8088 chip; IBM PC
1984	1er. Simposio de manipulación de datos espaciales	80286 chip, RISC chip; WGS-84
1985		Operación de GPS
1986	Burrough's Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment; MapInfo founded	SPOT 1 puesto en marcha
1987	International Journal of Geographical Information Systems Serie de Conferencias GIS/LIS; Reporte de "Chorley"	80386 chip; internet; teléfonos celulares
1988	NCGIA; GIS World; iniciativa RRL (Reino Unido)	Cae el muro de Berlín; internet; teléfonos celulares
1989	Asociación de Información Geográfica del Reino Unido	
1990		Berners-Less pone en marcha WWW
1991	USGS series de topografía digital completa; 1er. Simposio Internacional en integración SIG y modelado ambiental	Disolución de la Unión Soviética
1992		Cumbre Mundial de Rio – Agenda21
1993	Serie de conferencias sobre investigación en SIG Reino Unido	Pentium Chip; constelación GPS
1994	Consortio abierto de SIG	HTML
1995	OS finaliza la digitalización de 230,000 mapas	Java
1996	1ra. Conferencia Internacional sobre GeoComputación; transacciones en SIG	
1997	IJGIS cambia de "Sistemas" a "Ciencia"; ultima AutoCarto; Modelado geográfico y ambiental	Acuerdo de Kioto sobre reducción de CO2
1998	Journal of Geographical Systems; ultimo GIS/LIS	Disponibilidad selectiva de GPS
2003	1ra. Edición GIS, Environmental Modeling & Engineering	
2005	Google Maps, Google Earth	
2006		Revisión Stern : La economía del cambio climático
2008	Vista de Calle Google	

Fuente: Modificado de Brimicombe (2010)

### 2.6.1 Definición de Sistema de Información Geográfica (SIG)

Innumerables acepciones sobre la definición de SIG se han realizado en atención a los puntos de vista de diferentes autores, por lo cual se intentará definir de una manera clara que se entiende por un Sistema de Información Geográfica. Tres son los tipos de definición utilizados para agrupar las definiciones y son:

**Definiciones Tecnológicas.-** Son las que se refleja un interés especial por la técnica utilizada.

- a) Sistema digital para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos a fin de aportar información útil para las decisiones territoriales (Tolimson, 1984).
- b) SIG como denominación de bases de datos computarizada que contiene información espacial (Cebrián, 1988).
- c) Tecnología informática para gestionar y analizar la información espacial (Bosque-Sendra, 1992).
- d) Modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia ligado a la Tierra, establecido para satisfacer necesidades de información específicas respondiendo a un conjunto de preguntas concretas (Rodríguez-Pascual, 1993).

**Definiciones Globales.-** En las que predomina la idea global o abstracta de la técnica.

- a) Vemos a un SIG esencialmente como una herramienta para la investigación urbana y regional, análisis de políticas, simulación de actuaciones y planificación. Un SIG consiste en una base de datos que contiene datos referenciados espacialmente y que como un LIS (Land Information System) tiene una serie de procedimientos y técnicas para la captura, actualización y análisis de los datos (Scholten y Van Der Vlugt, 1990).
- b) Un SIG abarca tecnologías de la información, gestión de la información, asuntos legales y de negocios y conceptos específicos de materia de un gran abanico de disciplinas, pero es implícito en la idea de SIG que es una tecnología usada para tomar decisiones en la solución de problemas que tenga al menos una parte de componente espacial (Maguirre *et al.*, 1991).
- c) Un SIG puede ser concebido como una especialización de un sistema de bases de datos, caracterizado por su capacidad de manejar datos geográficos, que están georeferenciados y

---

que pueden ser visualizados como mapas (Bracken y Webster, 1990). Un SIG es un intento más o menos logrado, según los casos, de construir una visión esquemática de una realidad compleja (Bosque *et al.*, 1994).

- d) El SIG es una base de datos especializada que contiene objetos geométricos (Cebrián, 1994a; Cebrián, 1994b).
- e) Los SIG más que una tecnología, son un instrumento nuevo de percepción y comprensión del territorio (de Abreu 96)

**Definiciones Funcionales.-** Son las que están enfocadas en las tareas que puede realizar.

- a) Actualmente, pueden ser considerado como SIG, los sistemas de software que incluyen cuatro funciones entrada, almacenaje, manipulación y análisis y representación, y debe realizar eficientemente las cuatro tareas (Marble, 1990).
- b) Un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990).
- c) Sistema computarizado que provee los siguientes cuatro conjuntos operacionales georeferenciados: 1) entrada de datos; 2) uso de datos (almacenamiento y recuperación); 3) manipulación y análisis; y 4) salida (Aronoff, 1991).
- d) Un sistema de base de datos computarizados para captura, almacenaje, recuperación, análisis y visualización de datos espaciales (Huxhold, 1991).
- e) Conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, intercambiar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar y mostrar datos espacialmente referenciados a la tierra (Rodríguez-Pascual, 1993).
- f) Un sistema de información georeferenciado es una colección de tecnología de la información, datos y procedimientos de captación de información, almacenamiento, manipulación, análisis, presentación y estadísticas sobre características que puedan ser representadas en mapas (Huxhold y Levinsohn, 1995).
- g) Un SIG no es simplemente un sistema informático para elaborar mapas, aunque pueda crearlos a diferentes escalas, en diferentes proyecciones y con distintos colores. Un SIG es una herramienta de análisis. La mayor ventaja de un SIG es que permite identificar las relaciones espaciales entre características de varios mapas. Un SIG no almacena un mapa

---

en sentido convencional, ni almacena una imagen concreta o vista de un área geográfica. En vez de ello, un SIG almacena los datos a partir de los cuales se puede crear la escala deseada, dibujada para satisfacer un producto. En suma un SIG no contiene mapas o gráficos, sino una base de datos. El concepto de las bases de datos es central para un SIG y es la principal diferencia entre un SIG y simplemente un graficador de sistemas informáticos de cartografía, que solo puede producir buenos gráficos (Torres-Alfosea, 1995).

- h) Un SIG es un “conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas (Moldes, 1995).
- i) Un conjunto de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos (Burrough y McDonnell, 1998).
- j) Los Sistemas de Información Geográfica son sistemas diseñados para introducir, guardar, editar, recuperar, analizar y mostrar datos geográficos e información geográfica (DeMers, 2005).

Después de analizar las diferentes definiciones arriba detalladas, podemos aceptar y entender que los Sistemas de Información Geográfica son “un conjunto orquestado de partes (eso permite llevar a cabo muchas tareas interrelacionadas), que pueden incluir base de datos e información (sobre los cuales funciona el sistema), hardware y software (espacio, organización y análisis en el que reside la información), personas que usen el sistema en niveles y capacidades distintas y finalmente los clientes que pueden hacer uso de los productos gráficos y resultados alfanuméricos (DeMers, 2005; DeMers, 2009).

### **2.6.2 Los SIG como modelos de la realidad**

Los SIG se han posesionado como una tecnología básica, imprescindible y poderosa, para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espacialmente referenciados. Tienen rasgos específicos tales como su capacidad para almacenar grandes masas de información georeferenciada o su potencia para el análisis de la misma, que le hacen idóneo para abordar la planificación y gestión orientadas a la toma de decisiones (Gallego *et al.*, 2006; KC, 2008; Moreno-Jiménez, 2008).

Además de la capacidad propia de los SIG, técnicas ajenas a éstos han sido integradas a los mismos, técnicas tales como la evaluación multicriterio y multiobjetivo, para resolver ciertos problemas de índole espacial o territorial (Barredo-Cano, 1996).

La manifestación más tangible de ello es el esfuerzo e inversión que se destina a diseñar, implantar y mantener sistemas de información, que son unidades funcionales que se dedican a recopilar, almacenar, tratar o transformar, difundir o vender información (Moreno-Jiménez, 2008).

Los SIG ofrecen numerosas ventajas respecto a la cartografía convencional, puesto que de forma automática permiten manejar datos espaciales internamente referenciados, producir mapas temáticos y procesar información de tipo digital. Dentro de las principales áreas de aplicación de los SIG están los “SIG-ambientales” que pueden ser desarrollados en los ámbitos puntuales, locales, municipales, de administración territorial o regional y a espacios nacionales o continentales (Conesa-García, 1996).

Son estas cualidades las que permiten una mejor representación de la realidad en un entorno digital, por lo cual investigadores, administradores territoriales, instituciones de gobierno, inversores, industrias y compañías privadas generalizaron su uso con el objetivo de gestionar y administrar sus recursos hecho que permite tomar decisiones más acertadas para la ejecución de actividades de diversa índole.

### **2.6.3 Visión General del Software desarrollado para los SIG**

Existen muchos paquetes de software SIG en dominios públicos y comerciales. Varios de ellos fueron financiados y creados por apoyos académicos o gubernamentales. A continuación se presenta una breve descripción de los principales programas SIG disponibles en el mercado (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Resumen de software creado para los Sistemas de Información Geográfica

Software	Compañía	Descripción
ArcGIS	ESRI (Environmental Systems Research Institute)	Grande, complejo y sofisticado sistema, estable y robusto. Permite un amplio geo-procesamiento de datos. Manipula gran cantidad de formatos y tipos de datos, tiene una alta potencia analítica, es el más comercial y popular del mercado actual.
GeoMedia	Intergraph Inc.	Posee un completo conjunto de herramientas de edición, permite la programación de características especiales con su propio lenguaje, es hábil para integrar datos de diferentes fuentes divergentes, formatos y plataformas, complejos análisis espaciales son soportados.
MapInfo	MapInfo	Se concentra en aplicaciones para negocios y municipios. Posee un lenguaje que permite su incorporación a otras aplicaciones, sus productos específicos se diseñaron para la integración de cartografía en varias clases de aplicaciones.
Idrisi	Universidad Clark Massachusetts	Proporciona funciones de procesamiento de imágenes y SIG. Buenas funciones de visualización y análisis de datos espaciales. Desarrollado para ámbitos educativos que permiten crear aplicaciones propias. Disponible en el mercado.
Manifold		Combina SIG con funciones de sensor remoto, se puede extender con una serie de módulos individuales. Permite edición de imágenes en un marco especialmente referenciado las imágenes pueden ser cortadas y pegadas manteniendo su alineación.
AutoCAD Map	Autodesk, Inc.	Añade análisis sustancial al completo conjunto de entrada de datos del AutoCAD, importante capacidad de análisis espacial de datos.
GRASS	CERL	Código libre que se ejecuta en muchas plataformas, proporciona una amplia gama de raster y vectores de operación.
MicroImágenes	TNTmips	Integra sensores remotos, SIG y CAD. Posee amplitud de herramientas y soporta varias plataformas de hardware. Ofrece un impresionante conjunto de datos espaciales y herramientas de análisis. Herramientas de procesamiento de imágenes están disponibles.
ERDAS	Leica Geosystems	Ingresa y analiza datos de imágenes satelitales. Permite la disponibilidad de imágenes digitales de la superficie de la Tierra al público. Relativamente fácil y útil para desarrollar herramientas espaciales sobre la base de celdas para completar análisis de imágenes

**Fuente:** Creado a partir de información en Bolstad (2008)

## 2.7 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Dentro del ciclo hidrológico del agua (Figuras 2.1 y 2.2), el volumen de agua dulce disponible para consumo humano está distribuido entre las reservas superficiales (ríos, lagos y humedales) y las reservas hídras en los acuíferos. La Figura 2.3 muestra gráficamente la diferencia entre ambas fuentes en términos de volúmenes expresado en porcentaje del total de agua dulce. Como conclusión, podemos afirmar que los recursos de agua subterránea son las más importantes fuentes hídras para aprovechamiento y uso humano.

Por otra parte, el crecimiento poblacional a nivel mundial (Figura 2.4), producido durante las últimas seis décadas demuestra que la población actual fácilmente se duplico al número de personas registrado en 1950, siendo los centros urbanos los principales concentradores de habitantes sobre la faz de la Tierra.

Sin duda alguna, la concentración de personas en las ciudades provoca el crecimiento físico de las manchas urbanas (Figura 2.5), las cuales requieren mayores volúmenes de extracción de recursos hídras, pero también desechan importantes volúmenes de aguas residuales y contaminantes debido a las actividades desarrolladas por los seres humanos (Figura 2.6). En conclusión, existe mayor demanda de agua potable y se presentan procesos de contaminación del medio ambiente producto del desecho inadecuado de aguas servidas.

En México el crecimiento poblacional en el periodo 1950-2005 creció cuatro veces en términos generales (Tabla 2.1). La mayor explosión demográfica se produjo en las áreas urbanas donde, para el mismo periodo, se registro un crecimiento de  $\sim 7.20$  veces, para el 2005 se registraron casi 80 millones de habitantes urbanos en el país.

En México, se tiene disponibilidad de agua, pero existen zonas donde la explotación desmedida origina que exista reducida reserva hídras. En términos generales. Existió una reducción en la disponibilidad natural de agua per cápita de  $\sim 3.78$  veces entre 1950-2005 (Figura 2.9). Por tanto, se evidencia que existe una explotación creciente de los recursos hídras. Prueba de esta situación es el creciente número de acuíferos sobreexplotados que en 1975 eran 32 y para 2005 se registraron 104.

Por su localización geográfica, el área de estudio presenta características relevantes y muy importantes que son: clima semiárido, transición geológica entre dos importantes provincias geológicas (SMO y PCGM), importante actividad agrícola (plantaciones de cítricos), presencia de ciudades intermedias, pequeñas y comunidades ejidales aleatoriamente distribuidas, desarrollo industrial heterogéneo y crecimiento urbano sostenido. Por las características citadas arriba, la situación de los acuíferos y la calidad y cantidad de agua subterránea se encuentran bajo riesgo de

convertirse en una situación crítica, si se toma en cuenta que el acuífero ya tiene la categoría de sobreexplotado.

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas muy útiles y con capacidades muy amplias. La recopilación bibliográfica demostró su validez en el análisis de complejos problemas de diversa índole, pero principalmente en el análisis de grandes bases de datos destinadas a estudios ambientales de prevención, planificación, control y mitigación de impactos.

La gran variedad de software que permite trabajar con los SIG disponible hoy en día, amplía las opciones de investigación hidrogeológica y ambiental, en la presente investigación se utilizó el software *ArcGIS Desktop versión 9.3.1*, comercializado por ESRI y con licencia estudiantil facilitada por el Institut für Angewandte Geowissenschaften (TU-Darmstadt).

La ventaja de usar un SIG, es el de poder integrar información de diversa índole y con diversos orígenes destinados a realizar mapas de planificación del uso de suelo en el área de estudio en un entorno digital y bajo diferentes análisis matemáticos y geográficos.

## 3. MARCO GEOLÓGICO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La determinación de la historia geológica y paleogeográfica permite conocer las condiciones actuales del medio físico-geológico del área de estudio, las litologías presentes y los procesos de sedimentación de las diferentes formaciones geológicas que condicionan las características y distribución de los acuíferos del área de estudio.

El análisis geológico-estructural, de manera general, relaciona los recorridos y direcciones de flujo que el agua subterránea debe atravesar desde las zonas de recarga hasta las zonas de descarga dentro de un sistema hidrogeológico. En consecuencia, es necesario e importante elaborar el *Mapa Geológico-Estructural* del área de estudio para conocer mejor el comportamiento hidrogeológico.

En el presente capítulo, se describen breve y puntualmente los principales procesos geológicos, a escala regional, que permitieron inducir la evolución paleogeográfica del noreste de México (NE), la apertura del Golfo de México, la deformación Laramide, las características de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo de México así como su estratigrafía relacionada al área de estudio. Por otra parte, se realizó el registro de sitios de inventario para el análisis de geología estructural, en estos lugares se determinó las principales direcciones de fracturamiento de las formaciones depositadas en el área de estudio.

La Cuenca Hidrológica del Rio Pablillo (CHRP), se encuentra ubicada entre dos importantes provincias geológicas: a) la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM) y b) la Sierra Madre Oriental (SMO), las mencionadas provincias deben su origen principalmente al proceso de apertura del Golfo de México (GM) y la interacción tectonoestratigráfica entre las provincia del Golfo de México y la provincia del Pacífico ubicadas al este y al oeste de la actual posición de México (Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000; Goldhammer, 1999).

### 3.2 EVOLUCIÓN PALEOGEOGRÁFICA

La evolución de México en términos de geología, ha estado controlada por la acreción de terrenos tectonoestratigráficos a lo largo de límites transformantes o convergentes a lo largo del

tiempo geológico (Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993). Estos terrenos están conformados por unidades geológicas con edades desde el Precámbrico hasta el Paleozoico Superior.

Durante el Triásico Tardío, en lo que ahora es el NE de México, la Placa Norteamericana se separó de las Placas Africana y Sudamericana. Dicho rompimiento y posterior disociación de placas originó la formación de grabenes y horsts los cuales controlaron la distribución de tierras y mares a lo largo del tiempo. A su vez, los cambios en la distribución tierra-mar (transgresión y regresión marina) controlaron los modelos de sedimentación (Padilla y Sánchez, 1982).

Dos eventos fundamentales permitieron la formación de la Sierra Madre Oriental (SMO): a) El establecimiento de un margen pasivo debido al *rifting* y deriva post-Pangea que dio origen al GM y b) el segundo proceso fue el levantamiento de los estratos de rocas sedimentarias de margen pasiva, movimiento ocasionado por la influencia de una margen activa, deformando dichos estratos con una dirección SW-NE debido a la Orogenia Laramide (Goldhammer, 1999; Michalzik, 1986b; Padilla y Sánchez, 1982).

### 3.2.1 Formación del Golfo de México

El Golfo de México experimentó dos macro-fases en su formación durante el Triásico Tardío y el Jurásico: a) *Rifting* que inicialmente generó fosas (*grabens*) y pilares (*horsts*) y b) Deriva Continental, donde se creó corteza oceánica la cual desplazó al Bloque de Yucatán en dirección sur. Paralelamente, se presentó un moderado vulcanismo riolítico y sedimentación continental de lechos rojos que dieron origen al Grupo Huizachal (Goldhammer, 1999; Michalzik y Schumann, 1994).

En las dos macro-fases de formación del GM, se identificaron cuatro procesos importantes:

- a) Acreción de los terrenos Coahuila y Maya debido a la colisión diacrónica entre Gondwana y América del Norte durante el Paleozoico Tardío (Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993);
- b) Formación de altos y bajos estructurales ocasionados por la colisión entre América del Norte y Sur ocasionando *rifting* en la zona de sutura, se deposita el Grupo Huizachal (Triásico tardío - *Formación Alamar*; Jurásico Medio - *Formaciones La Boca y La Joya*) y la *Formación Minas Viejas* (Calloviano) donde se inicia la transgresión marina (Dickinson y Lawton, 2001; Goldhammer, 1999; Padilla y Sánchez, 1986);
- c) Deriva continental produciéndose la separación hacia el sur del Bloque de Yucatán (rotando  $\sim 42^\circ$  en sentido anti horario de su posición original) y América del Sur,

acompañada de una transgresión regional desarrollándose el Golfo de Sabinas, la Isla de Coahuila y el Archipiélago de Tamaulipas. Se depositaron carbonatos (*Formación Zuloaga*) y evaporitas (*Formación Olvido*) a consecuencia de la plataforma marina de facies someras. El proceso de subsidencia causó una trasgresión hacia el oriente, donde se depositó materia orgánica (*Oxfordiano-Formación La Casita*) (Adatte *et al.*, 1994; Dickinson y Lawton, 2001; Goldhammer, 1999; Götte, 1988; Michalzik y Schumann, 1994; Padilla y Sánchez, 1978; Padilla y Sánchez, 1982; Padilla y Sánchez, 1986; Salvador, 1987; Sedlock *et al.*, 1993);

- d) Durante el Cretácico (Berriasiano-Valanginiano), se incrementa la subsidencia formándose potentes plataformas carbonatadas de la *Formación Taraises*, en ambientes de cuenca la depositación de carbonatos derivó en la *Formación Tamaulipas* Inferior que posee nódulos de pedernal. En los alrededores del Bloque de Coahuila, la acumulación de carbonatos, limolitas y evaporitas rodeados por arrecifes originaron la *Formación Cupido* (Hauteriviano-Aptiano). El ascenso del nivel del mar dio lugar al depósito de una capa delgada de calizas y lutitas de la *Formación La Peña* (Aptiano). Posteriormente, se presentó una acumulación de plataforma y en sus facies someras se depositaron carbonatos de la *Formación Aurora*. En ambiente de mar abierto se depositan carbonatos micríticos con nódulos de pedernal que constituyen la *Formación Tamaulipas Superior* y en la parte sur de la Isla de Coahuila se depositan calizas con capas de pedernal de la *Formación Cuesta del Cura* (Albiano-Cenomaniano). Posteriormente, en el Cretácico Tardío continuó el levantamiento regional y se depositaron carbonatos de agua profunda en secuencias delgadas *Formación Agua Nueva* y carbonatos con material arcilloso *Formación Indidura* (Turoniano). El patrón de sedimentación se modificó ligeramente depositándose carbonatos de estratificación delgada y lutitas con horizontes de bentonita de aguas someras con intercalaciones de calcáreos finos (Coniaciano–Santoniano) dando lugar a la *Formación San Felipe*. En la etapa sin-orogénica (Campaniano–Maastrichtiano), toda el área fue cubierta por sedimentos terrígenos originados por cursos de agua fluvial del oeste de México, y posteriormente depositado en un ambiente de mar abierto en el cual se depositaron margas denominadas *Formación Méndez* (Burrows, 1910; Goldhammer, 1999; Imlay, 1936; Padilla y Sánchez, 1982; Schmidt, 1986).

### 3.2.2 Deformación Laramide

Iniciando el Paleógeno, las rocas del Mesozoico sufrieron una deformación producida por varios e intensos movimientos tectónicos, aunada a la deformación de las estructuras del basamento denominada Orogenia Laramide. Debido a estos movimientos se produjo una regresión

hacia el este de México, evidenciándose una divergencia acelerada entre la subsidencia de la PCGM y la elevación de la SMO.

La SMO fue dividida en cuatro provincias tectónicas que son: a) Altos estructurales: Isla de Coahuila, Archipiélago de Tamaulipas, Arco Burro Salado y Plataforma Valles - San Luis Potosí; b) El Cinturón Plegado y Cabalgado de la SMO; c) Cinturón Plegado de Coahuila y d) Cuencas de antepaís: Parras, La Popa, Tampico-Mizantla y Veracruz (Goldhammer, 1999). A continuación se describe el *Cinturón Plegado y Cabalgado de la SMO* por ser el rasgo tectónico más sobresaliente del noreste de México y de mayor relevancia en la presente investigación.

La Sierra Madre Oriental se caracteriza por una cadena montañosa deformada, se extiende al norte desde Parral, Chihuahua hasta su límite sur en Teziutlán, Puebla. Su morfología se originó por la deformación de rocas mesozoicas que fueron comprimidas y levantadas con dirección noreste, creando varias fallas de cabalgadura y normales además de pliegues. Su estructura se caracteriza por la presencia de isoclinales y pliegues ceñidos y volcados. Presenta sinclinales donde la *Formación Méndez* aflora en los núcleos y la *Formación Minas Viejas* aflora en los núcleos de los anticlinales, tanto sinclinales como anticlinales son apretados, simétricos y asimétricos, generalmente inclinados y erosionados (Chávez-Cabello *et al.*, 2004; De Cserna, 1956; Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000; Padilla y Sánchez, 1985).

Preponderantemente, a partir del Pleistoceno y hasta la actualidad predominan condiciones de erosión. Los materiales continentales transportados fluvialmente son depositados formando terrazas aluviales con todas las rocas erosionadas de la SMO (Chávez-Cabello *et al.*, 2004; Garza-Jiménez, 1993; Meiburg, 1987).

### 3.3 ESTRATIGRAFÍA DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La estratigrafía de la SMO se constituye mayormente de rocas sedimentarias terrígenas y carbonatadas del Mesozoico que se depositaron en un ambiente de rift a margen pasivo. Durante el Cretácico Tardío toda la secuencia marina sufrió plegamientos y fallas a causa de la orogenia Laramide (Goldhammer, 1999; Götte, 1988; Padilla y Sánchez, 1982; Padilla y Sánchez, 1986).

El proceso predominante que originó el ambiente de depositación, su litología y la concordancia con estratos superiores e inferiores de todas y cada una de las Formaciones nombradas a continuación se presentan en la Figura 3.1 la cual muestra la *Columna Geológica* del área de estudio desarrollada y propuesta en este trabajo de investigación.

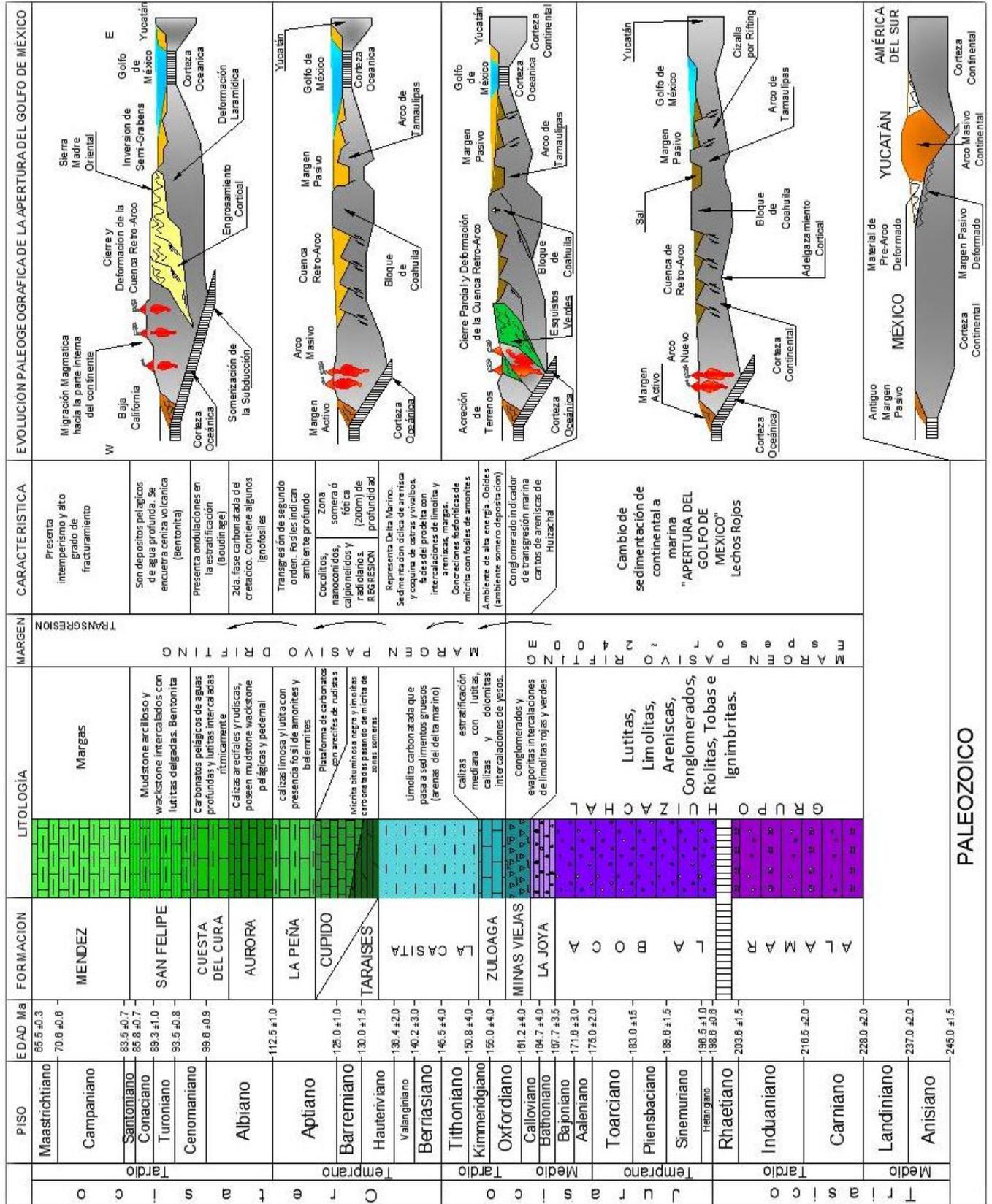


Figura 3.1 Relaciones crono-estratigráfica, sedimentológica y paleogeográfica del Noreste de México. Modificada de Barboza-Gudiño (2010), Goldammer (1999), Michalzik (1986b, 1987) y Padilla y Sánchez (1986).

### 3.3.1 Triásico Tardío

La *Formación Huizachal (Triásico Temprano o Medio - Oxfordiano Tardío)* fue definida por Imlay et al, (1948) como Grupo Huizachal, en su parte inferior se encuentra la *Formación La Boca* y su parte superior se ubica la *Formación La Joya*, ambas están compuestas por rocas mesozoicas no fosilíferas de lechos rojos continentales. (Meiburg, 1987; Mixon *et al.*, 1959; Padilla y Sánchez, 1982). De acuerdo a Barboza *et al.* (2010) esta Formación se denomina *Alamar*.

### 3.3.2 Jurásico

Las formaciones geológicas correspondientes a la era jurásica son: La Boca, La Joya, Minas Viejas-Olvido, Zuloaga y la Casita, las cuales se describen sucintamente a continuación:

La *Formación La Boca* está formada por capas delgadas de limolitas de colores rojos y púrpura y areniscas de color café pardo con estratificación cruzada. La *Formación La Joya* consiste de conglomerado rojizo intercalado con areniscas de color café pardo. En la parte suroeste de la CHRP se encuentran dos afloramientos ubicados cerca del Anticlinal Buena Vista

La Formación más antigua es *Minas Viejas-Olvido (Calloviano-Oxfordiano)* que debe su nombre a Humphrey y Díaz (1954), compuesta por yesos, lutitas y areniscas, se depositó en secciones restringidas, se infiere una altura ~600 m y aflora en el sector oeste al interior del perímetro de la CHRP (Goldhammer, 1999; Götte, 1988; Humphrey, 1956; Humphrey y Diaz, 1954).

La *Formación Zuloaga (Oxfordiano-Kimmeridgiano)* definida por Imlay (1938) compuesta por calizas de estratificación delgada a mediana de color gris a gris claro, poseen nódulos de pedernal negro y ooides. De espesores muy variables (máximo ~600 m y mínimo ~8 m). El afloramiento principal se encuentra al sur de la CHRP donde presenta estratos fuertemente karstificados impidiendo la identificación de planos de estratificación conteniendo zonas recristalizadas (Barboza-Gudiño *et al.*, 2010; Imlay, 1938; Imlay, 1943; Michalzik, 1986b; Michalzik, 1987; Michalzik, 1988; Padilla y Sánchez, 1982; Padilla y Sánchez, 1985; Santana-Salas, 2008).

Finalmente, la *Formación La Casita (Kimmeridgiano-Berriasiano temprano)* que litológicamente se compone de lutita de color gris oscuro o negro con intercalaciones de capas de caliza y arenisca amarillenta, también puede incluir conglomerado polimíctico, limolita, arenisca calcárea, caliza arcillosa, ligeramente fosfatada, marga, lutita calcárea bituminosa y pequeños bancos de carbón, además presenta abundantes concreciones fosilíferas. Su espesor varía en función de su proximidad a la Isla de Coahuila (650 a 800 m). Dentro del área de estudio se encuentra distribuida predominantemente en la parte sur y en menor presencia al oeste. En el

cañón Santa Rosa se compone de caliza arcillosa micrítica, lutita carbonatada y arenisca fina; las intercalaciones tienen espesores que varían entre 5 a 40 cm (Adatte *et al.*, 1992; Alvarado-Molina, 2004; Eguiluz de Antuñano *et al.*, 2000; Fortunato y Ward, 1982; Goldhammer *et al.*, 1991; Gutiérrez-Alejandro, 2008; Imlay, 1936; López-Ramos, 1980; Padilla y Sánchez, 1978; Padilla y Sánchez, 1982; Padilla y Sánchez, 1985; Santana-Salas, 2008).

### 3.3.3 Cretácico

Las formaciones correspondientes al Cretácico presentes en el área de investigación son:

*Taraises (Berriasiano–Valanginiano)* definida por Imlay (1937), formada por dos miembros; el superior constituido de caliza arcillosa delgada de color negro interestratificada con lutita calcárea de color gris claro y caliza nodular; el inferior presenta caliza arcillosa intemperizada tiene un color gris amarillento y su color original es gris oscuro. Posee una altura variable entre 135 a 500 m. Al interior del perímetro de estudio, presenta distribución parecida a la *Formación La Casita*, particularmente en el Cañón Santa Rosa está compuesta por intercalaciones de caliza y lutita (Goldhammer, 1999; Gutiérrez-Alejandro, 2008; Humprey, 1949; Imlay, 1936; Imlay, 1937; López-Oliva, 1989; Michalzik, 1988; Padilla y Sánchez, 1982).

La Formación es *Tamaulipas inferior (Hauteriviano–Barremiano)* que es la equivalente de ambiente de cuenca para la caliza de plataforma arrecifal de la *Formación Cupido*, compuesta de caliza de color gris, no tiene presencia de fósiles, constituye la secuencia más potente y morfológicamente con mayor relieve de la SMO (300 a 1,000 m). En las cercanías del área de estudio se encuentra aflorando en las crestas de la SMO. En el Cañón Santa Rosa presenta una serie de estratos de caliza masiva con las siguientes características: a) estilolitas diagenéticas paralelas a la estratificación y b) estilolitas tectónicas perpendiculares a la estratificación. La caliza tiene un color amarillento (intemperizado) y su color original es gris claro (Imlay, 1937; López-Oliva, 1989; Michalzik, 1988; Padilla y Sánchez, 1982; Porras-Vázquez, 2008).

Posteriormente se depositó la *Formación La Peña (Aptiano tardío)* que se comprende de dos miembros; a) superior con espesor de 300-400 m de caliza y b) el inferior de 100 m de espesor formado por caliza y lutita. Su importancia estratigráfica reside en ser un indicador litológico, morfológico y faunístico entre las *Formaciones Cupido y Aurora*, las cuales pueden presentar litologías y características muy similares entre sí. Presenta distribución amplia en la CHRP. En el Cañón Santa Rosa se evidencia una secuencia de caliza delgada de color gris oscuro rojizo con intercalaciones de lutita. Es posible reconocer nódulos de hierro, pirita y bandas delgadas de pedernal negro (Goldhammer, 1999; Humprey, 1949; Imlay, 1936; Porras-Vázquez, 2008).

*Tamaulipas Superior (Albiano temprano y medio)* se depositó en un ambiente de cuenca en el noreste de México, su equivalente de plataforma es la *Formación Aurora* y fue definida por Burrows (1910), representada por capas de caliza de color gris claro, densas y compactas. Posee una marcada estratificación, estilolitas diagenéticas bien desarrolladas y nódulos aislados de hematita y pedernal. Se encuentra coronando las crestas de la SMO y por disolución posee varias cavernas. Su espesor varía entre 100 a 200 m. En el Cañón de Santa Rosa se compone de caliza de estratificación mediana a gruesa con intercalaciones de espesor delgado de arcilla (Burrows, 1910; Goldhammer, 1999; Padilla y Sánchez, 1985; Porrás-Vázquez, 2008).

*Cuesta del Cura (Albiano tardío–Cenomaniano inferior)* fue definida por Imlay (1936), se compone en una secuencia de 80 m de caliza compacta de color gris claro a negro y de estratificación delgada. Su estratificación ondulada y la presencia de amonites permiten identificarla fácilmente, se encuentra intercalada por lentes, capas y nódulos de pedernal oscuro, se estima que tiene un espesor entre 65 y 250 m. Porrás-Vázquez (2008) en el Cañón Santa Rosa, describe esta Formación como roca caliza de color gris oscuro que intemperiza a color amarillento. Se evidencian intercalaciones de banda de pedernal de color negro y lutitas de espesor delgado (Imlay, 1936; López-Ramos, 1982; Porrás-Vázquez, 2008).

La depositación de la *Formación Agua Nueva (Cenomaniano tardío–Turoniano)* en las cercanías de Monterrey reporta un espesor entre 100 y 250 m. Está compuesta por caliza de estratificación delgada de color gris oscuro a negro, con nódulos de hierro e intercalaciones de lutita carbonosa y una estratificación laminar característica. En el área de estudio está presente en la parte central de la CHRP en el frente de la SMO. Gutiérrez-Alejandro (2008) la describió en el Cañón Santa Rosa, donde está compuesta por caliza arcillosa micrítica, con alternancia de marga y lutita carbonosa conteniendo nódulos de pedernal y nódulos de fierro de color rojizo (Gutiérrez-Alejandro, 2008; Muir, 1936; Padilla y Sánchez, 1982).

La penúltima Formación de esta era es *San Felipe (Coniaciano–Santoniano)* que está compuesta de caliza intercalada con lutita compacta de color grisáceo y color marrón amarillento ya intemperizada. Presenta estratificación delgada a laminar con espesores que varían entre 110 y 350 m. Por otra parte, exhibe horizontes bentoníticos de color verde y arenisca de grano fino. Se encuentra presente en los pliegues y cañones del frente de la SMO. De manera puntual, en el cañón Santa Rosa está compuesta por estratos de espesor delgado de caliza arcillosa biomicrítica de color gris verdosa, caliza arenosa, limolita y marga calcárea (Gutiérrez-Alejandro, 2008; López-Ramos, 1980; Martínez-Limas y Gómez-Alejandro, 2008; Muir, 1936; Padilla y Sánchez, 1982).

Finalmente la *Formación Méndez (Campaniano–Maastrichtiano)* descrita por Padilla y Sánchez (1982) como una secuencia de lutita limosa altamente quebradiza que presenta diferentes colores que varían entre gris oscuro, azules, negros y marrones. Posee espesores muy

potentes que alcanzarían los 1,500 m. Es la unidad marina más joven que se depositó en el frente de la SMO. En el límite superior de la *Formación Méndez* se encuentran depositados conglomerados y aluviones (terciarios y cuaternarios) resultado del transporte de materiales no consolidados por los antiguos cauces de ríos y arroyos que desembocan en la PCGM. En el Cañón Santa Rosa, la *Formación Méndez* se compone por lutita verdosa a gris clara, frágil, lutita calcárea y una pequeña capa de margas, intemperizada a color café oscuro (Gutiérrez-Alejandro, 2008; López-Ramos, 1982; Meiburg, 1987; Padilla y Sánchez, 1982; Ruíz-Martínez y Werner, 1997).

### 3.4 ESTRATIGRAFÍA DE LA PLANICIE COSTERA DEL GOLFO DE MÉXICO

La PCGM limita al oeste con el frente tectónico de la SMO, al norte con el Río Bravo, al este con el Golfo de México y al Sur con el Cinturón Volcánico Mexicano. Atraviesa los Estados de Nuevo León, Tamaulipas y Coahuila. Su formación se remonta a la etapa del levantamiento de la SMO y la paralela subsidencia de la PCGM. Época en la que grandes cantidades de sedimentos fueron erosionados y depositados en la cuenca de Burgos por acción de los ríos y arroyos (Terciario Temprano-Eoceno), los que erosionaron las rocas que estaban emergiendo desde el subsuelo debido a los movimientos durante la Orogenia Laramide. Presenta lomeríos con pendiente suaves en la mayoría de su superficie (De la Garza-González, 2000; Meiburg, 1987).

Debido a la regresión marina se produjo la depositación de sedimentos continentales de tipo deltáico y lagunares se produjo. Paralelamente, se generó un cambio en el relieve topográfico y de dirección de los flujos, los cuales pudieron provocar cambios en las facies de depositación (Galván-Mancilla, 1996).

Geológicamente, la PCGM se encuentra conformada por las *Formaciones San Felipe y Méndez* y por conglomerados y sedimentos aluviales. Tanto las *Formaciones San Felipe y Méndez* tienen edades del Cretácico Tardío mientras que los conglomerados y aluviones tienen edades del Paleógeno y Neógeno. Distinta gradación de gravas de distinta composición provenientes de boleas de caliza, pedernal, arenisca y lutita tienen alto grado de redondez evidenciando su origen y transporte desde la SMO.

Grandes terrazas aluviales que se originan en las bocas de los cañones de la SMO cubren una gran parte de la PCGM. Ellas se originan por la depositación de materiales erosionados que forman planicies cerca de los ríos, los cuales son deformados por movimientos tectónicos originando niveles diferentes en el proceso de depositación, los que permiten realizar el estudio de antiguos cauces de agua superficial (Ruíz-Martínez, 1990; Ruíz-Martínez y Werner, 1997).

La Figura 3.1 relaciona la estratigrafía mesozoica de las formaciones geológicas con el origen y los procesos evolutivos de la apertura del GM, la SMO y la PCGM.

Las rocas más antiguas que afloran en las cotas bajas del perímetro de la CHRP (ya en la PCGM) son del Cretácico tardío y están representadas por las *Formaciones San Felipe* (Coniaciano-Santoniano) y *Méndez* (Campaniano-Maastrichtiano). Los depósitos más jóvenes son conglomerados pertenecientes al Terciario y aluviones y conglomerados del Cuaternario, dichos sedimentos se encuentran cubriendo las formaciones arriba mencionadas.

*Formación San Felipe* identificada por De León-Gómez (1993) en alrededores de la Presa Cerro-Prieto, se compone de secuencias de calizas silificadas con bioturbación (capas blancas), areniscas nodulares, margas, rocas arcillosas sobrepuestas, areniscas verdes de grano fino a medio, limonitas verdosas de grano medio, lutitas arcillosas y capas de bentonita (De León-Gómez, 1993; Martínez-Vallejo, 2007).

En inmediaciones de la Presa Cerro-Prieto está descrita como una secuencia de caliza arcillo-margosa compacta, lutita, arenisca, caliza silificada y horizontes limolíticos y presenta un espesor de ~75 m. Esta secuencia se puede dividir en dos miembros (Martínez-Limas y Gómez-Alejandro, 2008):

- a) El miembro inferior tiene ~42 m de espesor y conformado por caliza arcillo-margosa de color gris, la caliza está interestratificada con lutitas de color gris a marrón y con horizontes de limolita delgada a mediana de color verde claro.
- b) El miembro superior tiene un espesor ~40 m conformado por calizas de color gris a beige, interestratificada por lutitas de color gris claro y una serie de estratos limolíticos de color verde claro a oscuro, pero su característica principal son capas blancas denominadas "Caliza Silificada", en general las rocas presentan alto grado de fracturamiento.

Al norte de la Presa Cerro-Prieto, en el Anticlinal Trincheras se define como una secuencia de estratos medianos a delgados de calizas margosas y arcillosas, con colores café claro, marrones y amarillentos producto del intemperismo. Dichos estratos presentan fracturas y en ocasiones se pueden encontrar concreciones. Se observan intercalaciones de estratos delgados y medianos de lutitas y limolitas de color café, café amarillento a marrón (De la Garza-González, 2000).

*La Formación Méndez* es la Formación geológica que cubre la mayor área dentro del perímetro de estudio, los mayores afloramientos se localizan en el centro y en el noreste de la

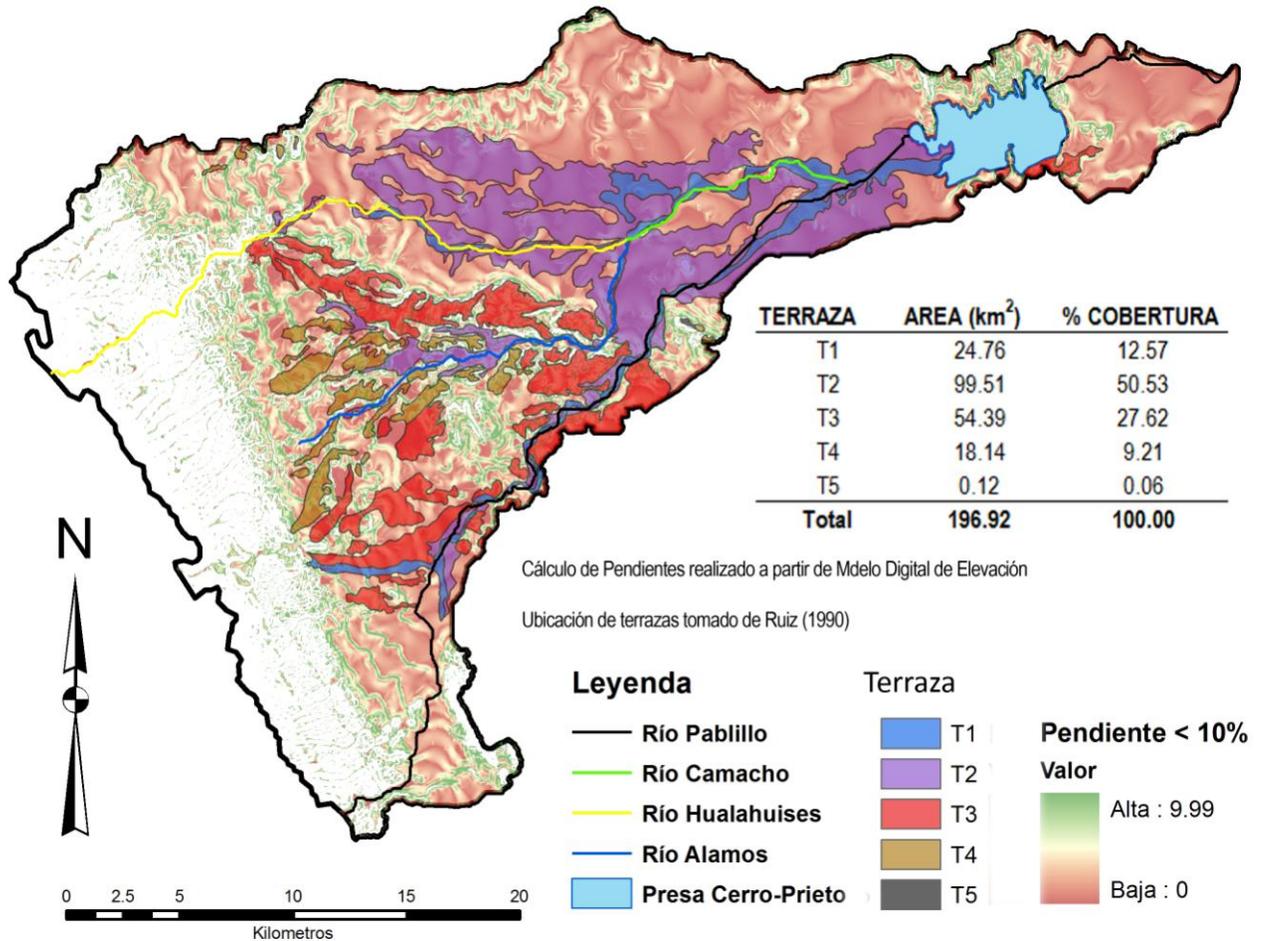
superficie de estudio sobre la PCGM, en las cercanías a los cursos fluviales se encuentra cubierta por conglomerados y aluviones. Se define como una potente unidad arcillosa que está compuesta por estratos laminares delgados y medianos de margas-lutíticas, de colores variables como gris oscuro, gris azulado, gris claro, café claro, marrones y café amarillento. Se puede presentar intercalaciones de margas y arcilla de color verde olivo con bioturbación en zonas puntuales y localizadas (De la Garza-González, 2000).

En el margen sur de la presa Cerro-Prieto, De León-Gómez (1993) realizó la descripción de esta unidad, donde se puede observar la *Formación Méndez* suprayacida discordantemente por conglomerados cementados y en ella se pueden identificar vetas de fractura rellenas de calcita y material yesífero (De León-Gómez, 1993; Martínez-Vallejo, 2007).

Generalmente la *Formación Méndez* se encuentra muy intemperizada, en algunas ocasiones quedando en forma de agujas, en otras formando suelos. En gran parte del área estudiada se encuentra muy fracturada y presenta vetas de calcita, y en algunas ocasiones, cristales de cuarzo. En su parte superior existe intercalación de lutitas con estratos de arenisca con potentes espesores de color gris claro, que intemperizado tiene un color café amarillento, dichos estratos se encuentran en las partes altas de algunos cerros del área como El Cerrito, Linares (De la Garza-González, 2000).

El tipo de fracturamiento de la *Formación Méndez* es muy característico, es de tipo concoidal, variando desde una estructura de laminillas, que cambian de una coloración gris en la roca sana a café amarillento, hasta suelos. En inmediaciones de la ciudad de Linares, se distribuye principalmente en el lomerío El Tepeyac-San Paulo, El Cerrito y el Cerro La Tortuga. En el Cerrito, se presenta en forma de material suelto o suelo arcilloso semi-consolidado. Presenta un intenso fracturamiento, con extensión intra-fracturas desde pocos milímetros hasta ~2 cm, algunas de ellas con rellenos de calcita, mostrando en algunas zonas una cubierta de caliche en su superficie. Existen intercalaciones con estratos de areniscas masivas, cuyos espesores varían desde 0.4 hasta 1.5 m aproximadamente. Estas rocas presentan un fracturamiento alto y la extensión entre fracturas varía en ocasiones desde 1 hasta 10 cm (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2004; Lizárraga-Mendiola, 2003).

Los *Sedimentos del Terciario y Cuaternario forman las terrazas fluviales*, que fueron depositadas por los ríos de la SMO: Pablillo, Santa Rosa, Hualahuises y Camachito, se constituyen de material heterogéneo dependiendo de la zona de captación de las sub-cuencas. Los depósitos de las terrazas tienen un alto grado de redondez y de tamaños. Las terrazas generalmente muestran superficies planas y con pocas irregularidades, van desde la más antigua T5 a la más joven T1. La Figura 3.2 presenta la distribución y cobertura de las terrazas en el área de estudio:



**Figura 3.2** Relación de pendiente y formación de terrazas aluviales.

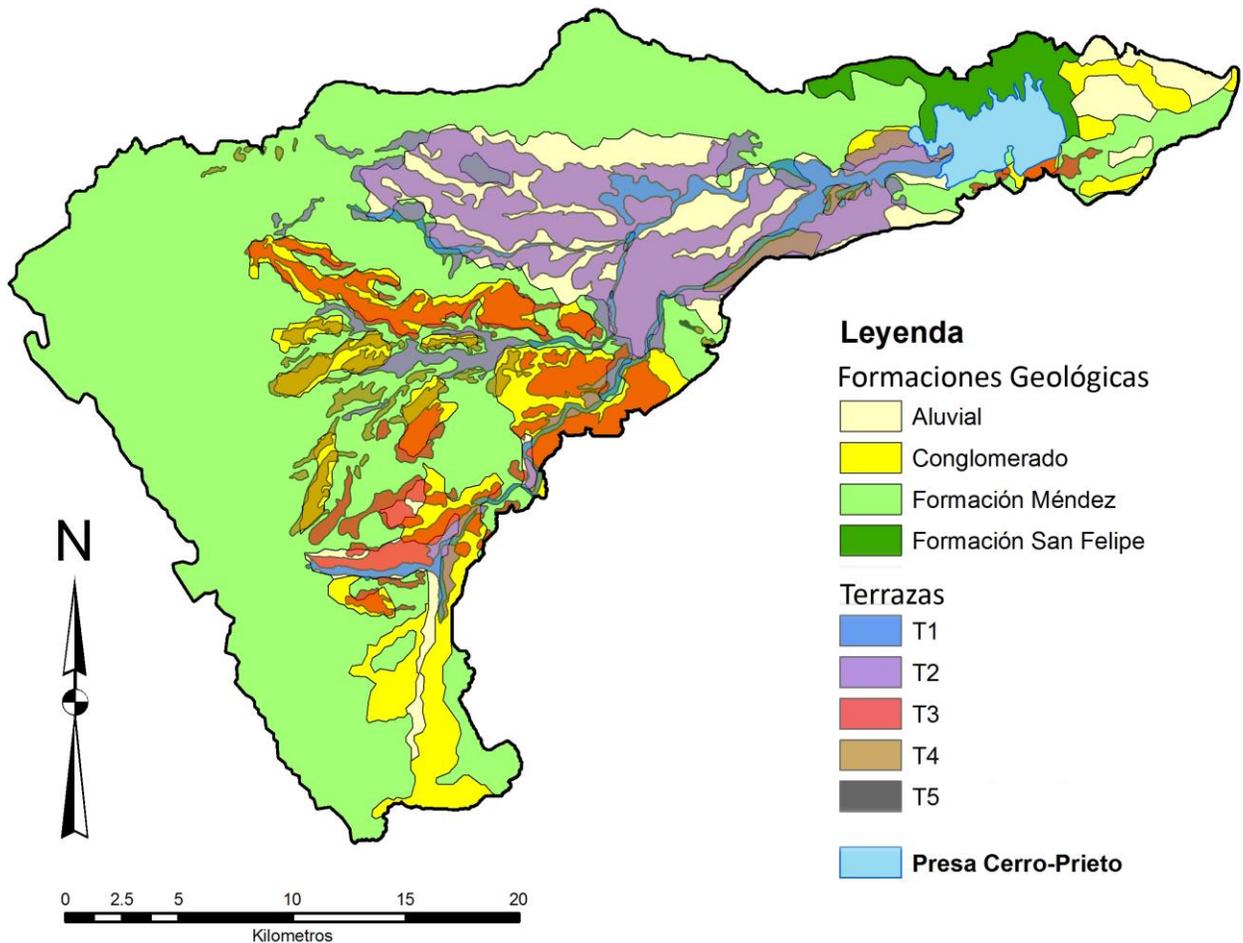
**Terraza (T5).**- Es considerada la más antigua, se encuentra en la parte noreste en las partes alta de algunas colinas (Cerro del Tepeyac), en su cima el conglomerado está muy bien cementado por caliche. Se compone por gravas de caliza, lutita y pedernal, materiales que provienen de la erosión de las rocas de la SMO. Tiene separaciones de hasta 1 cm entre gravas, que pueden encontrarse total o parcialmente rellenos de cristales de calcita. Color gris en las Figuras 3.2 y 3.3 (De la Garza-González, 2000; Garza-Jiménez, 1993; Ruíz-Martínez, 1990).

**Terraza (T4).**- Se encuentra hacia el oeste y suroeste del área de estudio en un nivel más bajo que la T5. Es un conglomerado compuesto por bloques, gravas y arenas con un cemento calcáreo; también, presenta lentes de arenas, arcillas y limos; en su parte superior se ha desarrollado una capa de humus de espesor variable y de color amarillento y amarillo rojizo con espesor variable, mostrada en color café claro en las Figuras 3.2 y 3.3 (De la Garza-González, 2000; Garza-Jiménez, 1993; Ruíz-Martínez y Werner, 1997).

Terraza (T3).- Presenta distribución aislada, su espesor puede variar entre 2 y 5 m, es un conglomerado formado por cantos rodados, gravas y bloques cementados por caliche. Al igual que la T4 contiene lentes de sedimentos más finos como: arenas, arcillas y limos. En su coronamiento, presenta un color café rojizo, producto de la alteración química de minerales de fierro, por contacto con la humedad del clima, en algunos sectores es parte del acuífero de gravas. Color rojo en las Figuras 3.2 y 3.3 (De la Garza-González, 2000; Garza-Jiménez, 1993; Ruíz-Martínez y Werner, 1997).

Terraza (T2).- Son depósitos aluviales que principalmente se encuentran en las márgenes de los cauces de los ríos y arroyos. La T2 consta de material poco consolidado con espesores que van desde 3 a 6 m. Los sedimentos más finos se presentan en forma de lentes de arena, limos y arcilla, la velocidad de flujo (capacidad de transporte de sedimentos) define el tamaño de los mismos. Esta unidad se constituye en parte del acuífero de gravas por estar localizado en la zona central y noreste al interior del área de estudio, identificada por el color violeta de las Figuras 3.2 y 3.3 (De la Garza-González, 2000; Garza-Jiménez, 1993; Ruíz-Martínez, 1990).

Terraza (T1).- Los lechos de los ríos y arroyos constituyen directamente la T1, se trata de material que hoy en día es depositado en las márgenes o en los meandros de los ríos principales de la zona. La T1 está formada por una alternancia de horizontes de grava, arena y lentes de limo y arcilla. Posee alta permeabilidad al igual que la T2, por lo tanto, la conectividad hidráulica entre ríos-acuíferos es muy factible. Mostrada en color azul claro en las Figuras 3.2 y 3.3 (De la Garza-González, 2000; Garza-Jiménez, 1993; Ruíz-Martínez, 1990).



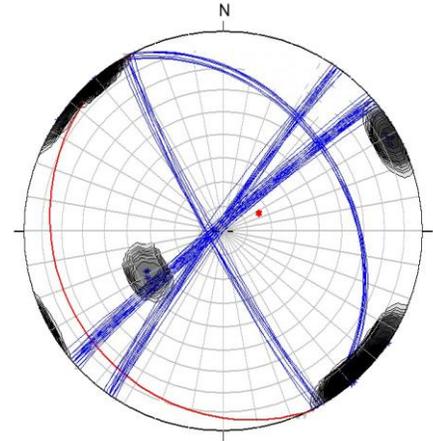
**Figura 3.3** Ubicación de las terrazas aluviales sobre las Formaciones geológicas

### 3.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Se describe la información estructural referida al fracturamiento en la región de la PCGM, el fallamiento y pliegues principales ubicados en el frente de la SMO y que son parte del perímetro de la CHRP, se muestra las falsillas y la ubicación de los puntos de registro en las Figura 3.4 a 3.15.

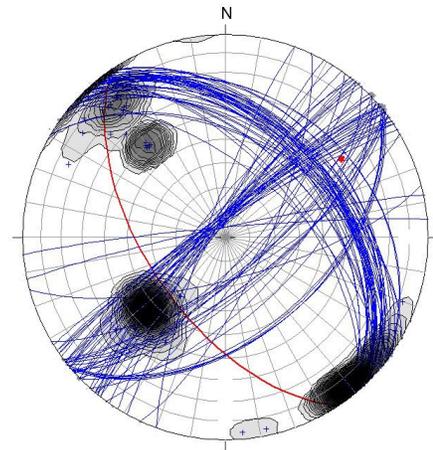
La *Formación Méndez* presenta fracturas de tensión y cizalla, este sistema de fracturamiento puede ser empleado para diferentes propósitos, una de las finalidades más utilizadas es la determinación de la inferencia y correlación de direcciones principales de flujo del agua subterránea. Una cantidad importante de datos fueron colectados y medidos en campo en 11 sitios de inventario estructural correspondientes a la *Formación Méndez*, los cuales fueron seleccionados en atención a su posición geográfica, la calidad del afloramiento y representatividad los cuales son brevemente descritos sobre la base de datos recopilados en campo y analizados en el trabajo de gabinete. La ubicación de los sitios de muestreo se presenta en la Figura 3.15 que se encuentra geo-referenciada en coordenadas UTM.

**M02** A orillas del Río La Laja, debajo del puente La Laja (Carretera Federal 85). La estratificación buza suavemente al SW, se registró fracturas de tensión, en un sistema combinado las cuales siguen dos direcciones principales ac (NE-SW) y bc (NW-SE). Las fracturas de cizalla registradas son hk0 en un par conjugado. Número total = 116; Estratificación =  $243^{\circ}/16^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $315^{\circ}/88^{\circ}$ ;  $241^{\circ}/84^{\circ}$  y  $61^{\circ}/36^{\circ}$  (Figura 3.4).



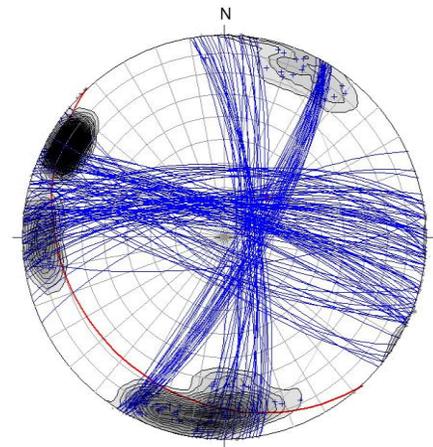
**Figura 3.4** Red de Fracturas sitio M-02

**M03** En las orillas del Río Camachito de la ciudad de Linares, afloramiento intemperizado por el agua. La estratificación se encuentra buzando al SW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (NE-SW) y bc (NW-SE). Las fracturas de cizalla hk0 en una dirección. Un número total de 112. Estratificación =  $236^{\circ}/58^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $45^{\circ}/45^{\circ}$ ;  $319^{\circ}/84^{\circ}$  y  $138^{\circ}/65^{\circ}$  (Fig 3.5).



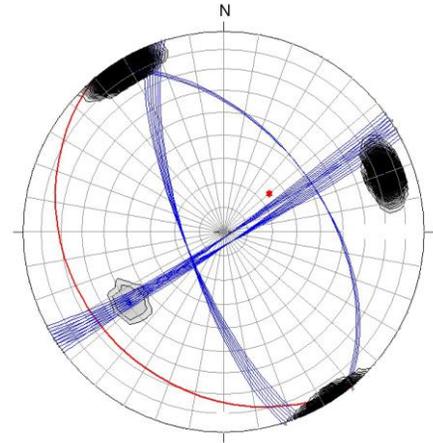
**Figura 3.5** Red de Fracturas sitio M-03

**M04** En las orillas del Río Camachito (Linares), afloramiento intemperizado por acción del agua. Buza al SW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (NE-SW) y bc (NW-SE). Las fracturas de cizalla hk0 en una dirección. Número total = 182; Estratificación =  $250^{\circ}/41^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $38^{\circ}/78^{\circ}$ ;  $121^{\circ}/79^{\circ}$ ;  $353^{\circ}/73^{\circ}$  y  $207^{\circ}/80^{\circ}$  (Figura 3.6).



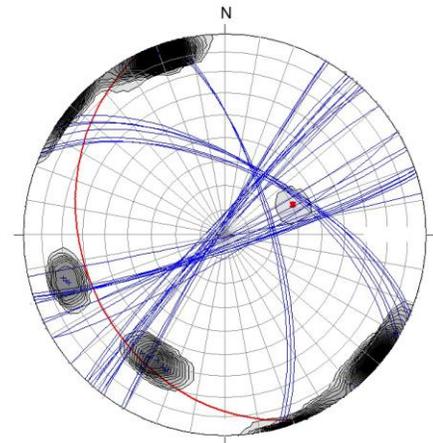
**Figura 3.6** Red de Fracturas sitio M-04

**M06** Ubicado en el Río Camachito después de la conjunción del arroyo El Cangrejo y el río Álamos. La estratificación se encuentra buzando al SW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (NE-SW) y bc (NW-SE). Las fracturas de cizalla hk0 en una dirección. Número total = 201; Estratificación =  $230^{\circ}/24^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $148^{\circ}/86^{\circ}$ ;  $250^{\circ}/74^{\circ}$  y  $53^{\circ}/49^{\circ}$  (Figura 3.7).



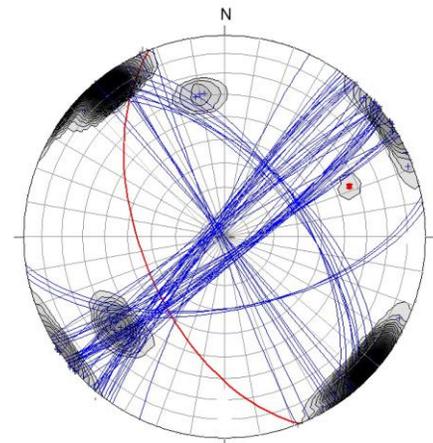
**Figura 3.7** Red de Fracturas sitio M-06

**M07** Cerca de la unión de los ríos La Cebadilla y Álamos. La estratificación buza al SW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (N-S) y bc (W-E). Las fracturas de cizalla hk0 en una dos direcciones. Número total = 49; Estratificación =  $246^{\circ}/30^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $159^{\circ}/85^{\circ}$ ;  $309^{\circ}/87^{\circ}$  y  $46^{\circ}/65^{\circ}$  (Figura 3.8).



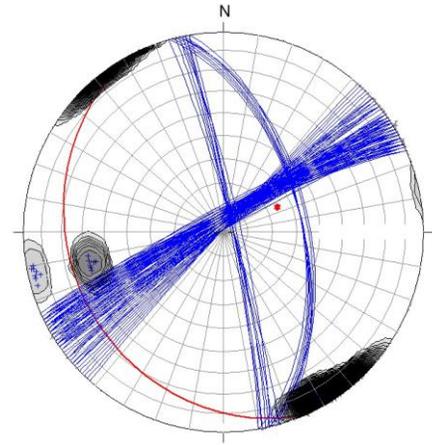
**Figura 3.8** Red de Fracturas sitio M-07

**M08** Sobre la unión de los ríos Camacho y Hualahuises, (puente Carretera Federal 85) colonia Camacho (Linares). La estratificación buza al SW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (NE-SW) y bc (NW-SE). Las fracturas de cizalla hk0 en una dos direcciones. Número total = 72; Estratificación =  $248^{\circ}/56^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $313^{\circ}/85^{\circ}$ ;  $146^{\circ}/79^{\circ}$ ;  $236^{\circ}/89^{\circ}$  y  $50^{\circ}/59^{\circ}$  (Figura 3.9).



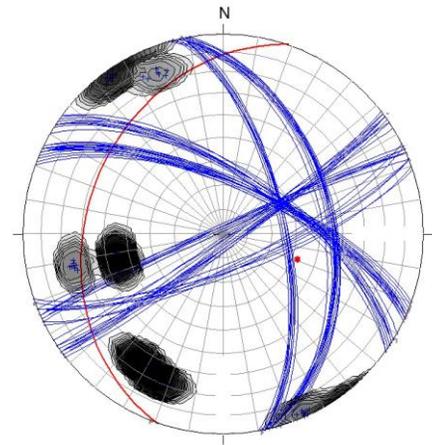
**Figura 3.9** Red de Fracturas sitio M-08

**M09** A orillas del Río La Laja (Ejido El Pinto), el afloramiento intemperizado por acción del agua de río. La estratificación buza suavemente al SW, se registró fracturas de tensión, en un sistema combinado las cuales siguen dos direcciones principales ac (NE-SW) y bc (NW-SE). Las fracturas de cizalla registradas son hk0 en un par conjugado. Número total = 294; Estratificación =  $245^{\circ}/24^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $325^{\circ}/86^{\circ}$  y  $77^{\circ}/66^{\circ}$  (Figura 3.10).



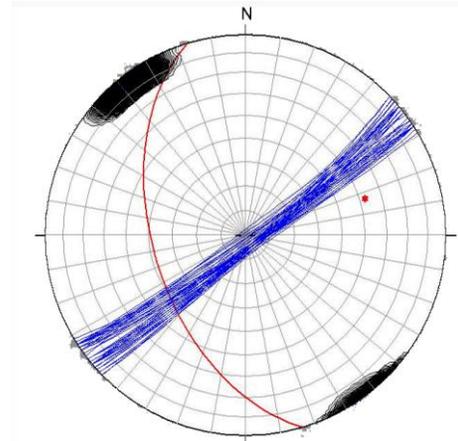
**Figura 3.10** Red de Fracturas sitio M-09

**M10** En la unión del río Hualahuises y el arroyo La Nubia. La estratificación buza al NW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (N-S) y bc (NE-SW). Las fracturas de cizalla hk0 en una dos direcciones. Número total = 174; Estratificación =  $289^{\circ}/32^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $50^{\circ}/60^{\circ}$ ;  $148^{\circ}/82^{\circ}$  y  $148^{\circ}/82$  (Figura 3.11).



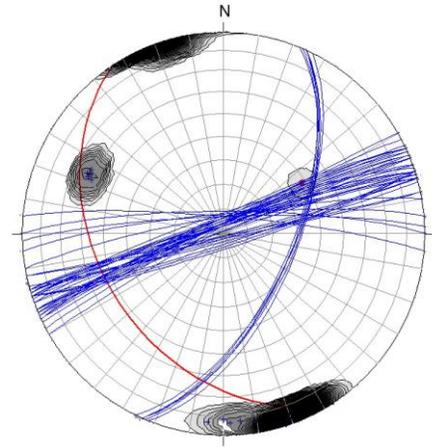
**Figura 3.11** Red de Fracturas sitio M-10

**M11** Ubicado en el río Hualahuises (El Sabinal). La estratificación buza al SW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en una sola dirección principal ac (NE-SW). Las fracturas de cizalla no se presentan claramente en el afloramiento. Número total = 131; Estratificación =  $253^{\circ}/52^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $142^{\circ}/85^{\circ}$  y  $325^{\circ}/89^{\circ}$  (Figura 3.12).



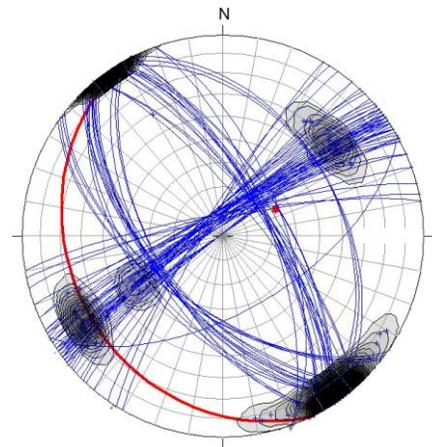
**Figura 3.12** Red de Fracturas sitio M-11

**M12** Se localiza en un corte en las orillas de la carretera vecinal entre San Antonio-El Ojo de Agua, afloramiento intemperizado. Buza al W, posee fracturas de tensión en una sola dirección principal ac (E-W). Las fracturas de cizalla hk0 en una dirección. Número total = 64. Estratificación =  $237^{\circ}/38^{\circ}$ . Fracturamiento =  $340^{\circ}/85^{\circ}$  y  $143^{\circ}/76^{\circ}$  (Figura 3.13).



**Figura 3.13** Red de Fracturas sitio M-12

**M14** Punto localizado a orillas de la carretera de ingreso al ejido San Antonio. La estratificación buza al NW, posee fracturas de tensión, en un sistema combinado en dos direcciones principales ac (N-S) y bc (NE-SW). Las fracturas de cizalla hk0 en una dos direcciones difícilmente distinguibles. Número total = 133. Estratificación =  $243^{\circ}/24^{\circ}$ ; Fracturamiento =  $324^{\circ}/85^{\circ}$ ;  $59^{\circ}/63^{\circ}$  y  $229^{\circ}/60^{\circ}$  (Figura 3.14).



**Figura 3.14** Red de Fracturas sitio M-14

Las fracturas correspondientes a la *Formación San Felipe*, registradas en el afloramiento ubicado en la parte norte de la Presa Cerro Prieto fueron realizadas y analizadas a detalle en la tesis realizada por Martínez-Vallejo en el 2007, quien determinó una dirección de buzamientos SW a SE. Las direcciones principales de fracturamiento por tensión también fueron registradas y siguen dos direcciones al NE y NW, estando los tipos ac y bc distribuidos en estas direcciones dependiendo del punto en análisis. Las fallas de cizalla presentes en la *Formación San Felipe* son de tipo hk0 en su gran mayoría (Martínez-Vallejo, 2007).

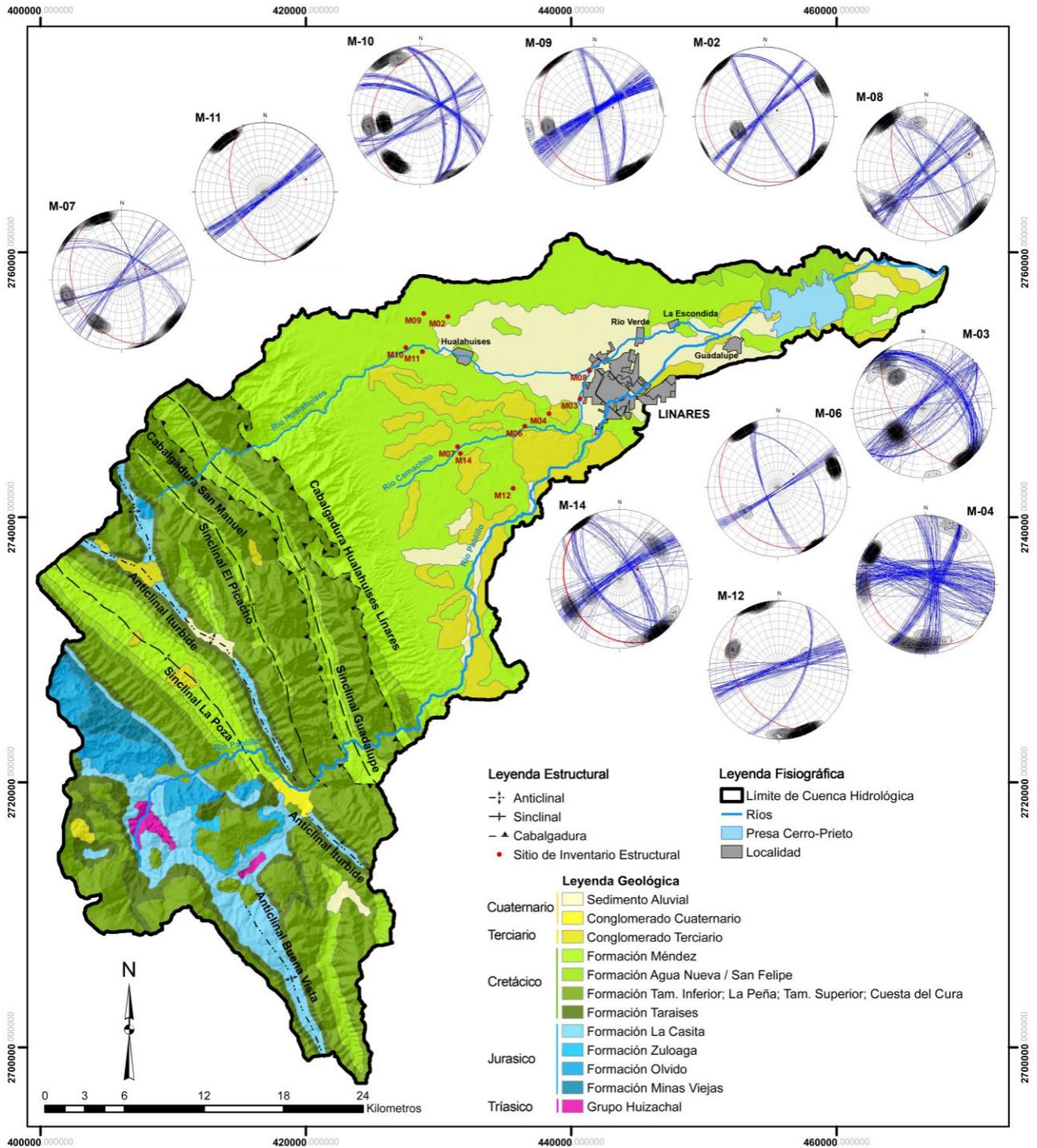


Figura 3.15 Mapa Geológico – Estructural de la Cuenca del Río Pablillo

### 3.6 CONCLUSIONES

La ubicación geográfica de la CHRP, dentro de la SMO, tiene la presencia de la mayoría de las Formaciones geológicas características del Noreste de México. Las cuales van desde el Triásico Tardío hasta sedimentos que aun en el presente se encuentran siendo erosionados, transportados

y depositados por acción de los cursos fluviales como agentes principales de esta actividad geológica.

En el área de la SMO se encuentran depositadas y deformadas principalmente calizas de edad mesozoica, siendo esta litología la dominante al este del cabalgamiento frontal de la SMO.

En la PCGM al interior del perímetro del área de estudio, la Formación dominante es *Méndez*, distribuida a lo largo y ancho del perímetro de la CHRP, también se evidencia el afloramiento de la *Formación San Felipe* localizada al norte de la Presa Cerro Prieto, estas Formaciones son las únicas correspondientes al periodo Cretácico, se constituyen la base litológica por la potencia de sus espesores.

Por otra parte, los materiales terrígenos originarios de la SMO (conglomerados y aluviones), fueron transportados por los cauces de agua, actualmente se encuentran distribuidos en terrazas cementadas por caliche o no cementadas, dependiendo de su elevación y posición con relación al curso de agua. Estas terrazas en cotas bajas y colindantes con la red hídrica, constituye un medio de conexión hidráulica entre ríos y acuíferos presentes en la zona.

Estructuralmente, la SMO posee una “Cabalgadura Hualahuises - Linares” en su frente, en contacto con las rocas más jóvenes que están sobre la PCGM. Un cabalgamiento de segundo orden denominado “Cabalgadura San Manuel” que se encuentra atrás del cañón Guadalupe (Figura 3.15).

Los sinclinales presentes en el área de este a oeste son: a) Sinclinal Guadalupe; b) Sinclinal El Picacho y c) Sinclinal La Poza. Los anticlinales al interior de la CHRP son: a) Anticlinal Iturbide y b) Anticlinal Buena Vista, nombrados de este a oeste. Se presenta una zona de fallas entre el sinclinal Guadalupe y el sinclinal El Picacho, paralelo al curso del río Pablillo (Figura 3.15).

En la PCGM concretamente en la *Formación Méndez*, se tiene una orientación promedio de estratos de  $245^{\circ}/35^{\circ}$ , con foliación en dirección paralela. La estratificación presenta una orientación promedio predominante de  $248^{\circ}/39^{\circ}$  y  $102^{\circ}/25^{\circ}$ . Con el análisis del fracturamiento se determinó que existen cuatro sistemas de fracturas: a) Sistema principal con dirección preferente entre  $220^{\circ}$  y  $203^{\circ}$  de azimut; b) Sistema secundario perpendicular al primero y con dirección preferencial de  $110^{\circ}$  a  $120^{\circ}$  de azimut; c) Sistema terciario tiene una dirección entre  $280^{\circ}$  a  $290^{\circ}$  de azimut y d) Sistema cuaternario casi perpendicular al terciario y con dirección preferencial de fracturamiento de  $190^{\circ}$  a  $200^{\circ}$ .

Las fracturas de tensión evaluadas en los diferentes puntos de medición, se encuentran sobre los planos “ac” y “bc”, demostrado de esta forma que este comportamiento está generalizado desde el frente de la SMO hasta en el sector noreste (Presa Cerro-Prieto), que son los afloramientos mas adentrados en la PCGM.

## 4. MARCO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PABLILLO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El padre de la hidrología como la conocemos actualmente es Pierre Perrault (1674) quien demostró con cantidades cuantitativas que las lluvias y las nevadas son la causa de los ríos en su obra *De l'origine des fontaines*, que fue considerado el principio de la hidrología científica (Linsley *et al.*, 1977). Pero su consolidación como ciencia independiente se produce durante los últimos sesenta o setenta años, por lo cual la mayoría de los conceptos actuales de la hidrología datan de la década de los 30's.

La definición más aceptada hoy en día de esta ciencia es: "Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos" (Chow, 1964)

Los procesos que estudia la hidrología son tan complejos y variados que es difícil, sino imposible, prever si alguna vez será considerada como ciencia exacta, los resultados son solo estimaciones. Las herramientas en las que se basa la hidrología son: la geografía física, la meteorología, la geología, la hidráulica, las matemáticas y estadística. Por lo tanto, cada caso es un problema de investigación, por lo que se convierte en un reto intelectual sistemático, un ejercicio de la imaginación y de la inteligencia, de la prudencia y del sentido de la observación (Aparicio-Mijares, 2007).

De manera puntual, se efectuó el análisis hidrológico de la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo (CHRP), para lo cual se generó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en el software ArcGIS. Se consideraron datos hidrometeorológicos del periodo comprendido entre 1982-2007 de 7 estaciones climatológicas y 6 estaciones hidrométricas, se analizó y completó la serie de datos proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2007a). Se calcularon los valores de precipitación media por dos métodos distintos a objeto de verificar la validez de su aplicación. Se calculó la evapotranspiración del área de estudio incluyendo variables específicas para los cultivos de cítricos, que son predominantes en la zona. Se realizó una estimación de la demanda de agua debido a las actividades antrópicas, se elaboró una breve reseña histórico-técnica de la Presa José López Portillo Cerro-Prieto (PCP) y finalmente se analizaron los resultados obtenidos.

## 4.2 CUENCA HIDROGRÁFICA Y SISTEMA DE DRENAJE

La Cuenca Hidrológica es la unidad básica de estudio en hidrología. Se define como una zona de la superficie terrestre (simulando ser impermeable) donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Asociada a cada una de estas cuencas existe una cuenca subterránea cuya forma en planta es similar a la superficial.

Desde el punto de vista de su salida, existen dos tipos de cuencas: endorréicas que tienen el punto de salida al interior de la cuenca y generalmente es un lago y las exorréicas en las cuales el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca (Aparicio-Mijares, 2007). De acuerdo a esta clasificación la CHRP, se define como una cuenca exorréica, que tiene su punto de salida al noreste de la PCP.

Toda cuenca posee características que permiten su clasificación en dos tipos: características que condicionan el volumen de escurrimiento (área de la cuenca, el tipo de suelo, etc.) y las características que condicionan la velocidad de respuesta (orden de corrientes, pendiente de la cuenca y de los cauces, etc.), todas estas características se encuentran detalladas a continuación.

### 4.2.1 Morfología

El relieve topográfico es el condicionante básico para poder delimitar una cuenca hidrológica, la importancia de la topografía radica en que define varios parámetros de las cuencas entre ellos: el parteaguas (límite de cuenca), la red de drenaje, las pendientes de los cauces principales, procesos erosivos y transporte de sedimentos.

Se generó un MDE con datos levantados con GPS en campo durante los recorridos de identificación, medición piezométrica y toma de muestras en los pozos y norias consideradas en el estudio y se complementó esta información con la digitalización de cartas topográficas a escalas 1:250,000 y 1:50,000 (INEGI, 1999; INEGI, 2006).

En total se generaron más de 95,000 puntos geo-referenciados (3D-X,Y,Z) que representan, en promedio, una densidad de 57 puntos por cada  $\text{km}^2$ , posteriormente se interpolaron utilizando el módulo TOPO TO RASTER (TTR), el mismo que está diseñado específicamente para la generación de relieves topográficos hidrológicamente correctos con datos de puntos, polilíneas y polígonos, procedimiento basado en el programa ANUDEM (Hutchinson, 1988; Hutchinson, 1989; Hutchinson y Dowling, 1991).

La interpolación permitió generar el MDE con una resolución de célula de 30 m por lado, en total se tienen ~1,850,000 celdas que servirán como base de datos para determinar matemáticamente las áreas de captación de la CHRP. Se determinó que la máxima altura de la cuenca es 3,153 m.s.n.m. y la mínima altura de la cuenca tiene un valor de 220 m.s.n.m.

#### 4.2.2 Parámetros Físicos de la CHRP

##### Parteaguas de la CHRP

El parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa una cuenca de las cuencas vecinas. En este caso en particular, el parteaguas de la CHRP fue determinado por el análisis digital de la base de datos topográficos, utilizando el modulo Flow Direction (FDR) en ArcGIS, el mismo que compara las alturas de las celdas y genera un raster con la orientación del descenso más rápido de cada célula (Jenson y Domingue, 1988).

##### Área y perímetro de la CHRP

El área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas. El área de la CHRP fue calculada por medio de la aplicación del modulo Arc Hydro (ESRI, 2009b), delimitándose un área de 1665.08 km<sup>2</sup> y que tiene un perímetro de 354.36 km.

##### Clasificación de la CHRP por su tamaño

Con base a la superficie que cubren las cuencas pueden ser clasificadas. Según la Tabla 4.1, la CHRP está catalogada como Intermedia–Grande.

**Tabla 4.1** Clasificación según el tamaño de cuenca

Área (km <sup>2</sup> )	Designación
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia–Pequeña
500 a 2,500	Intermedia–Grande
2,500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy Grande

**Fuente:** Tomado de (Campos-Aranda, 2007)

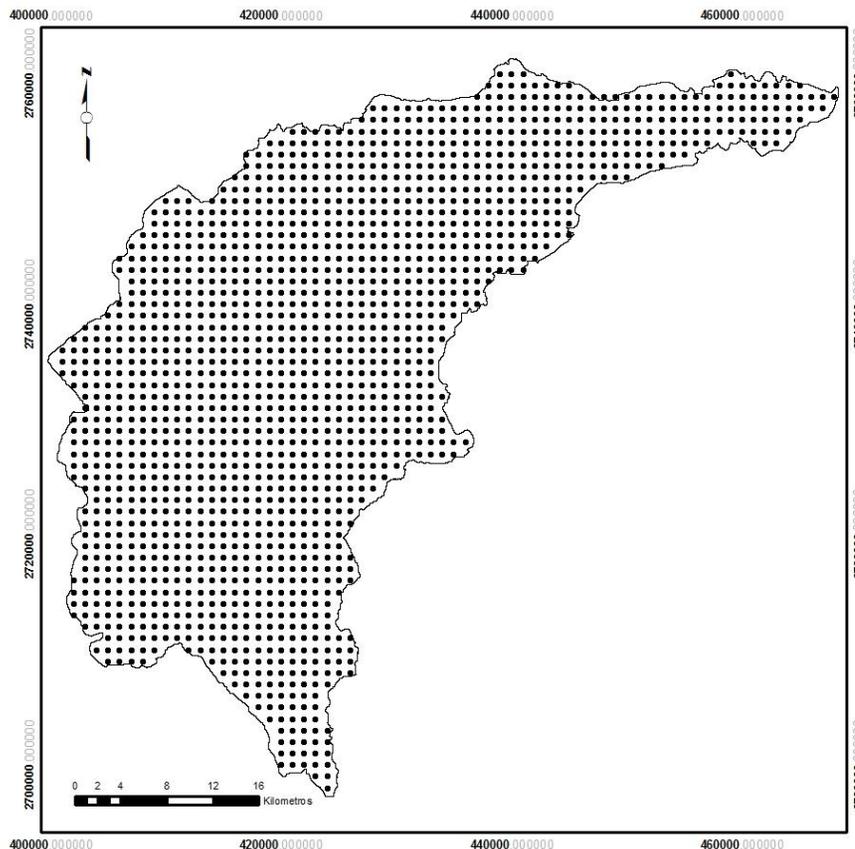
### Índice de compacidad

El índice de compacidad (Ic) es el cociente adimensional del perímetro de una cuenca (P) y la circunferencia (Pc) de un círculo de igual área (A) al de la cuenca. calculado de la CHRP es de 2.45 que nos indica que es una cuenca relativamente alargada (Campos-Aranda, 2007).

$$Ic = \frac{P}{Pc} = \frac{0.282 P}{\sqrt{A}} \quad (4.1)$$

### Altitud Media

Se generó una nube de puntos en 2 dimensiones equidistantes cada kilómetro en ambas direcciones al interior de la CHRP (Figura 4.1), sobreponiendo estos puntos al MDE fue posible obtener las cotas topográficas de 1622 puntos con los cuales se obtuvo un valor de altura media de la Cuenca Hidrográfica de  $H_{med}=1,056.33$  m.s.n.m.



**Figura 4.1** Puntos generados para determinar la altura media de la CHRP.

### Relación de Elongación

La relación de elongación (Re), se define como el cociente adimensional entre el diámetro de una circunferencia (D) que posee igual área (A) al de la cuenca y la longitud (Lc) definida por la mayor dimensión a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria paralela al cauce principal. Debe variar entre 0.6 y 1, donde 1 significa relieve bajo y 0.6 a 0.8 significa relieves fuertes y pendientes pronunciadas del terreno. La CHRP tiene un valor de Re= 0.635, hecho que se explica por la variación de elevaciones que alcanza ~2930 m de diferencia entre la cota máxima y mínima.

$$Re = D/Lc = 1.1284 \times \sqrt{A/Lc} \quad (4.2)$$

### **4.2.3 Parámetros del Sistema de Drenaje**

#### Densidad de corrientes

Se define como el número de corrientes perenes o intermitentes por unidad de área.

$$D_s = \frac{N_s}{A} = 0.031 \quad (4.3)$$

Donde:

Ds = Densidad de corrientes  
A = Área de la cuenca  
Ns = Numero de corrientes al interior de la cuenca

#### Densidad de drenaje

Definida como la longitud de corrientes por unidad de área.

$$D_s = \frac{L_s}{A} = 0.21 \quad (4.4)$$

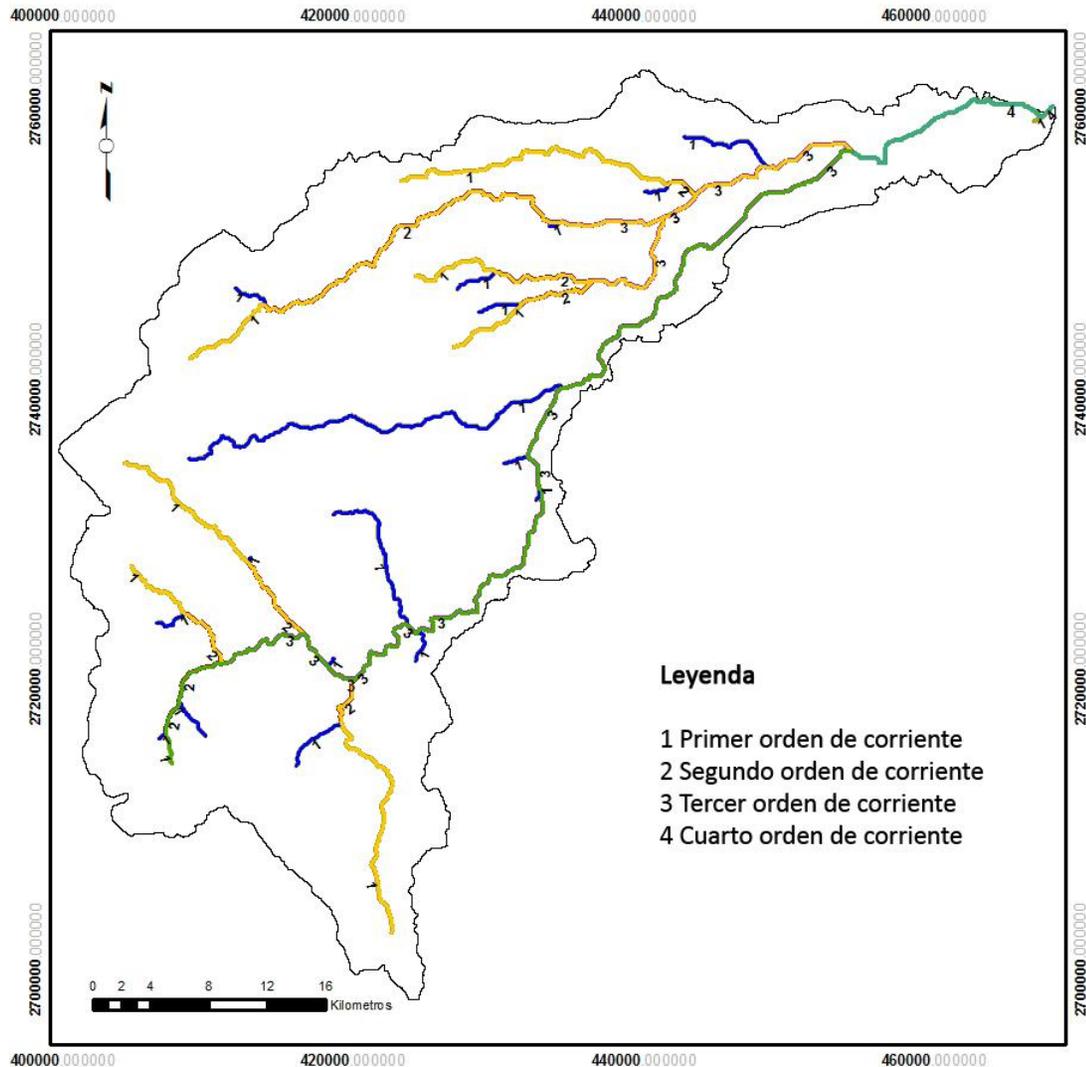
Donde:

Dd = Densidad de drenaje  
A = Área de la cuenca  
Ls = Longitud total de las corrientes

Se debe a rocas muy resistentes o a muy buena permeabilidad y es catalogado como drenaje muy escaso.

### Orden de Corriente y Colector Principal

Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 2 forman una de orden 3, y así sucesivamente hasta llegar a la corriente que sale de la cuenca. La CHRP tiene un  $Oc=4$  (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Orden de Corrientes de la CHRP.

### Colector Principal

La corriente principal de la cuenca es la que pasa por la salida de la misma (en cuencas exorréicas), entre más corrientes tributarias tenga la corriente principal más rápida será su respuesta a la precipitación.

Dentro del sistema de drenaje de la CHRP, se determinó que el colector principal es el río Pablillo con una longitud de 89.17 km, como se muestra en la Figura 4.3, también se muestra todos los cauces generados matemáticamente con el Modulo Arc Hydro del software ArcGIS, los mismos tienen como condición un área mínima de captación de 5 km<sup>2</sup>. Procedimiento con el cual se obtuvo un total de 52 cursos de agua.

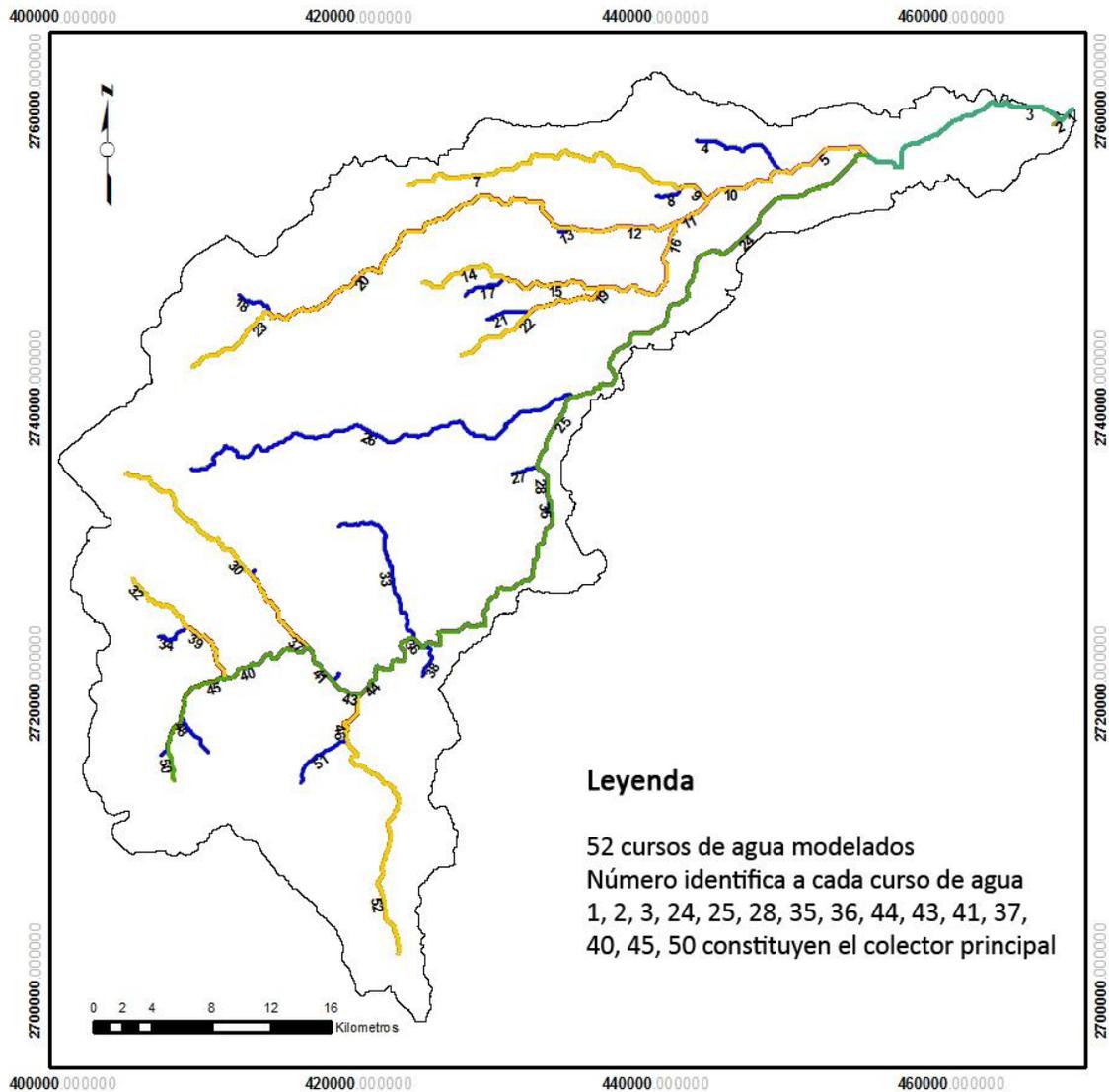


Figura 4.3 Red de Cauces de la CHRP.

### Perfil del Cauce Principal

La pendiente del cauce principal varía constantemente, por lo cual es necesario definir una pendiente media, en el caso de río Pablillo, se determinó la pendiente media de cada tramo del río

(Figura 4.3 líneas color verde). En la Tabla 4.2 se presentan los valores de pendiente obtenido para cada tramo.

**Tabla 4.2** Pendientes obtenidas para los tramos del río Pablillo.

Tramo	Código	Longitud (km)	Pendiente %		
	Mapa		Promedio	Máximo	Mínimo
1	24	29.64	-0.51	2.08	-3.54
2	25	5.9	-0.45	0.30	-4.74
3	28	2.61	-0.55	0.00	-1.27
4	35	17.78	-1.24	24.66	-0.89
5	36	1.21	-1.50	30.53	-20.93
6	44	7.47	-1.79	33.63	-50.60
7	43	2.28	-0.76	5.40	-17.90
8	41	3.1	-0.70	4.49	-28.17
9	40	7.015	-1.67	24.18	-33.92
10	45	5.36	-2.85	13.09	-29.67
11	47	2.75	-3.76	6.57	-40.25
12	50	2.29	-5.28	4.90	-40.59

Las corrientes se pueden clasificar según dos criterios importantes (Chow, 1966):

- a. Por el tiempo en el que transportan agua.
  1. Corriente Perenne el punto más bajo del cauce se encuentra siempre abajo del nivel de aguas freáticas. Transportan agua durante todo el año. Están alimentadas por el agua subterránea, es decir son efluentes.
  2. Corriente intermitente, es la que transporta agua en la época de lluvias de cada año. En épocas secas el nivel freático queda por debajo del punto más bajo del cauce en esta situación el cauce no transporta agua.
  3. Corriente efímera es aquella que el nivel freático esta siempre debajo del punto más bajo del cauce y transportan agua inmediatamente después de una tormenta, son los que alimentan los almacenamientos de agua subterránea.
- b. Por su posición topográfica o edad geológica.
  1. Ríos de Montaña son los que tienen cotas elevadas sobre el nivel del mar, tienen grandes pendientes y pocas curvas debido a las altas velocidades que alcanza el agua, sus cauces contienen cantos rodados con un poco de grava y casi nada de finos.
  2. Ríos de transición presentan algunas curvas, con velocidades de agua moderada sus cauces contienen principalmente por grava, algo de cantos rodados y arena.
  3. Ríos de planicie son los que presentan numerosos meandros debido a las bajas velocidades del agua, su cauce contiene arenas y finos, generalmente se encuentran en cotas cercanas al nivel del mar.

### Áreas de Captación (Micro-cuencas)

La CHRP, fue analizada topográficamente con el objetivo de verificar la delimitación de INEGI (1983). Este análisis consideró la elevación de las celdas que forman el MDE para identificar el parteaguas, esta información fue complementada y verificada con los módulos “Flow Direction” y “Flow Accumulation” los cuales utilizan las alturas topográficas para definir dirección y acumulación de drenaje superficial. (ESRI, 2009c; INEGI, 1983b).

Como resultado del análisis se verificó que el perímetro final de la CHRP se modificó, en varios sectores del perímetro, principalmente en la parte central norte (color naranja Figura 4.4), esta área queda fuera del área total de captación debido al relieve topográfico, provocando una variación en área de  $\sim 100 \text{ km}^2$  en total.

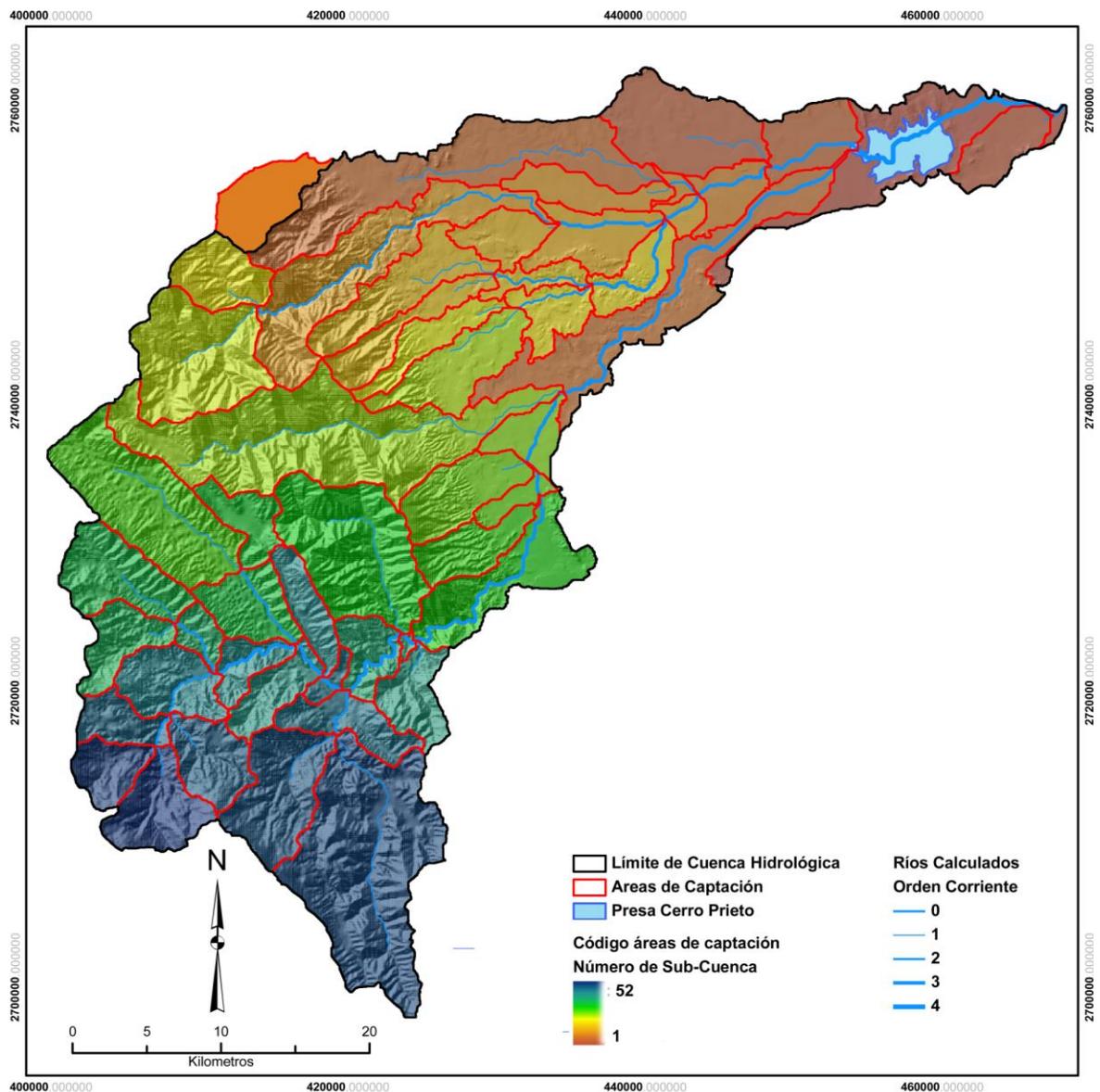


Figura 4.4 Áreas de captación de la cuenca CHRP.

La determinación de los “*catchments*” (áreas de captación de micro-cuencas) fue realizada utilizando el modulo Arc Hydro, el cual delimitó 52 áreas de captación, se verificó este resultado por la coincidencia del numero de cauces, ambos grupos de resultados deben tener el mismo número de elementos. La Figura 4.4 muestra la distribución final de la red de cauces y de áreas de captación calculadas numéricamente (ESRI, 2009a; ESRI, 2009b).

#### 4.2.4 Tiempo de concentración (Tc)

Es el lapso de respuesta de la cuenca a la lluvia y se define como el tiempo que tarda el escurrimiento de la tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más distante hasta la salida de la cuenca o punto de interés. Aplicando la estimación empírica propuesta por Kirpich (Williams, 1950), a la CHRP tenemos:

$$T_c = 0.066 \left( \frac{L_c}{\sqrt{H/L_c}} \right)^{0.77} = 0.066 \left( \frac{89.17}{0.1813} \right)^{0.77} = 7.80 \quad (4.5)$$

Donde:

Tc = Tiempo de concentración

Lc = Longitud colector principal de la cuenca

H = Desnivel entre el punto de salida y el punto más alto de la cuenca

A modo de verificación podemos calcular el mismo parámetro de acuerdo a la estimación de velocidad de la creciente (Vc), con apoyo en la aproximación propuesta por Won (Heras, 1979), se obtiene:

$$T_c = \frac{L_c}{V_c} \quad (4.6)$$

Vc = Velocidad de la creciente que puede ser calculada con la fórmula propuesta por Rizha (Won, 1974).

$$V_c = 72 \left( \frac{H}{L_c} \right)^{0.60} = 72 \left( \frac{2.9328}{89.17} \right)^{0.60} = 9.28 \quad (4.7)$$

Reemplazando valores para el cálculo de Tc, se obtiene:

$$T_c = \frac{89.17}{9.28} = 9.60 \quad (4.8)$$

Por los resultados obtenidos, en ambos casos el Tiempo de Concentración es menor a 10 horas que sería el tiempo máximo estimado para ver la respuesta de la cuenca a tormentas.

### 4.3 ANÁLISIS DE DATOS CLIMATOLÓGICOS

#### 4.3.1 Precipitación

Debe su origen a la humedad presente en la atmósfera, la cual debe ser enfriada para poder llegar al punto de saturación, este efecto es inducido por las masas de aire frío ascendente, pero la saturación no representa precipitación, se requiere de núcleos de condensación, sobre los cuales se forman las gotas de agua. La forma más común de precipitación es la lluvia que se clasifica en tres categorías (Linsley *et al.*, 1977):

- Ligera, para tasas de caída 2 de hasta 2.5 mm/h.
- Moderada, desde 2.5 hasta 7.6 mm/h.
- Fuerte, mayores a 7.6 mm/h.

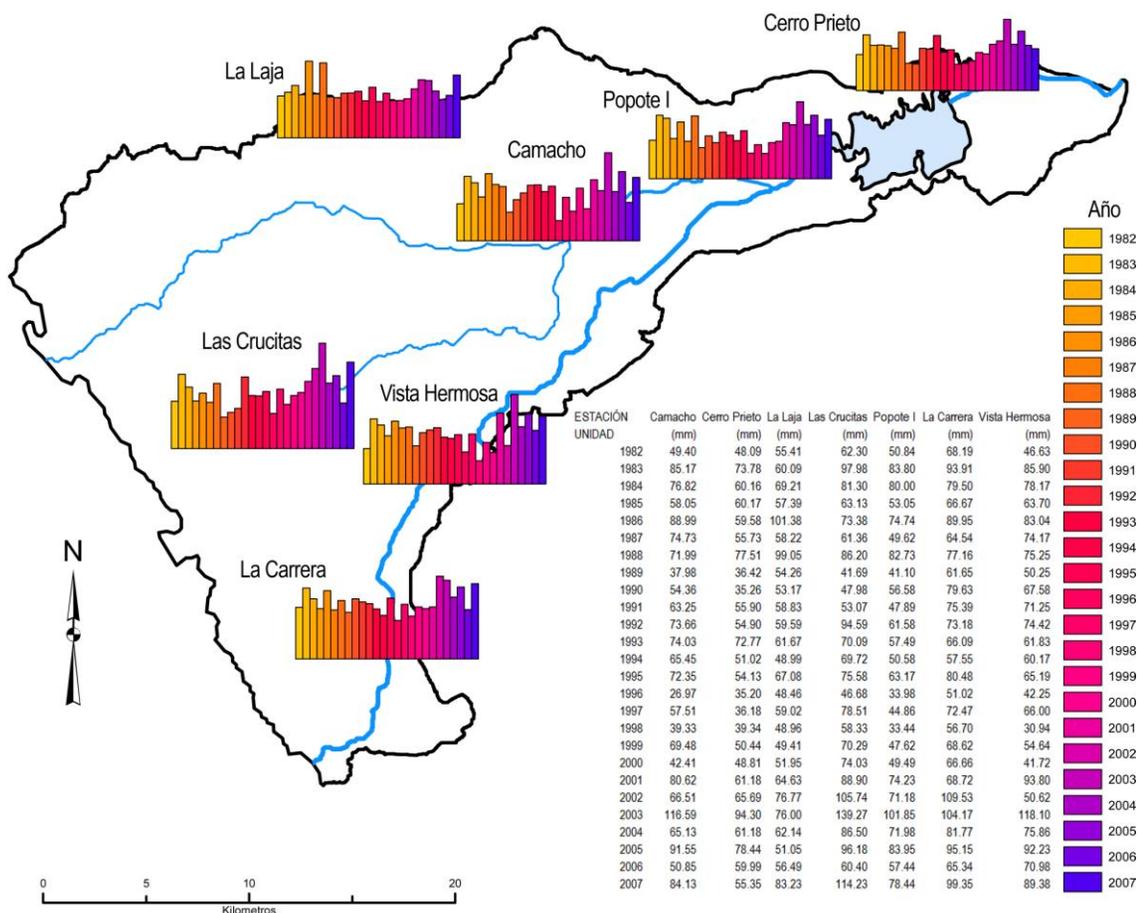


Figura 4.5 Precipitación Media Mensual 1982-2007 (CNA).

En el área de estudio, se realizaron mediciones de la precipitación usando pluviómetros (1982-2007) que son administrados por la Comisión Nacional del Agua, los cuales se encuentran distribuidos en siete estaciones climatológicas. La Figura 4.5 presenta los valores de precipitación media mensual para una serie de 25 años (CNA, 2007a).

La Figura 4.5, muestra el valor más bajo (26.97 mm) para el año 1996, y su máximo valor (139.27 mm) para la gestión 2003, y la precipitación mensual promedio es de 67.08 mm. Las precipitaciones máximas mensuales están reportadas en la Figura 4.6.

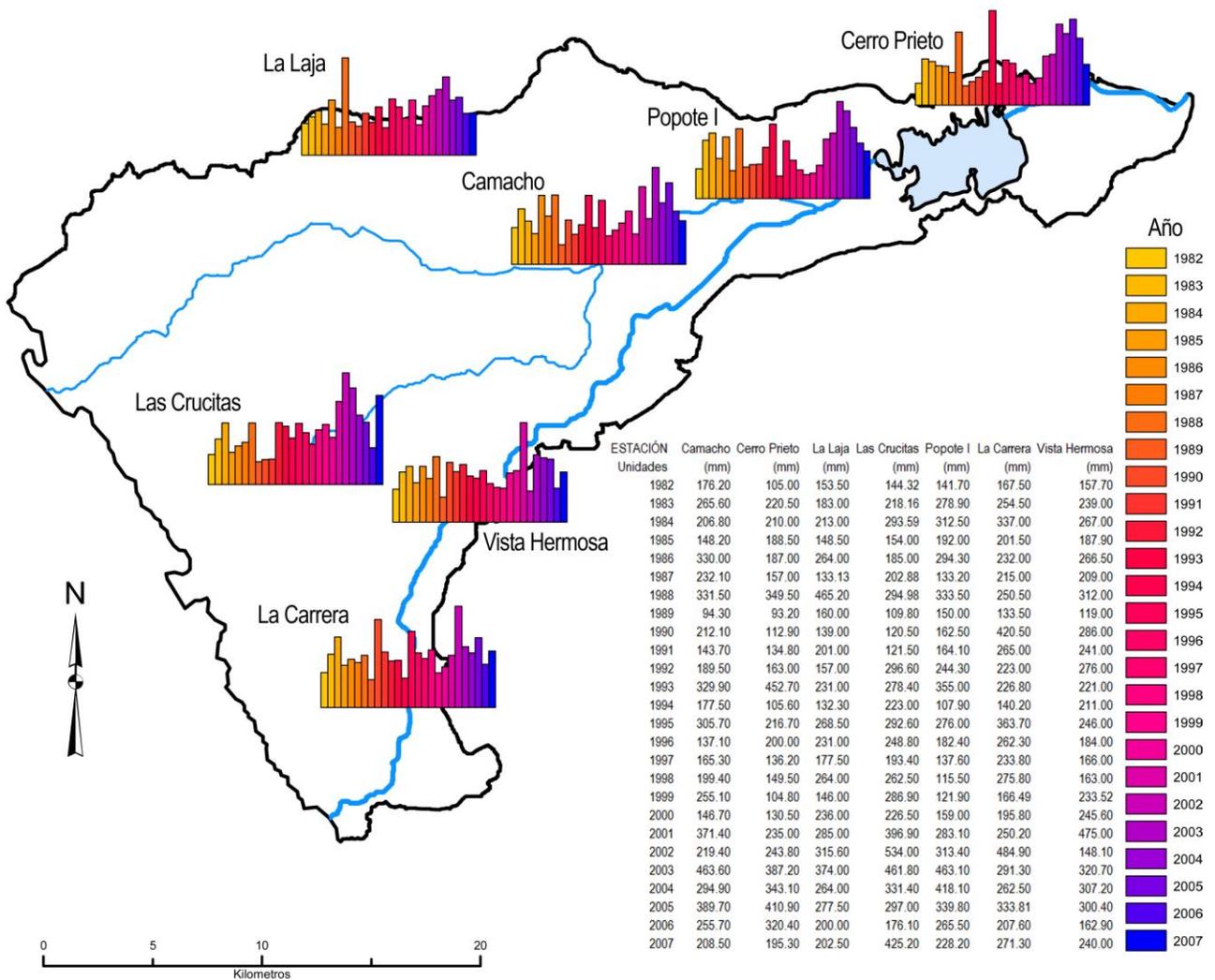


Figura 4.6 Precipitación Máxima Mensual 1982-2007 (CNA).

Se tiene registrado que la precipitación máxima se produjo en la estación Las Crucitas en 1989 (534 mm). El comportamiento de estas precipitaciones en la serie de datos analizados se muestra más variable.

En la Figura 4.7 se muestran las precipitaciones medias anuales, las cuales evidencian que el año con menor precipitación fue 1996 (487.81 mm), por el contrario el año más lluvioso fue el 2003 registrando una precipitación total de 1286.18 mm. La precipitación anual promedio en el área de estudio es de 1035.64 mm.

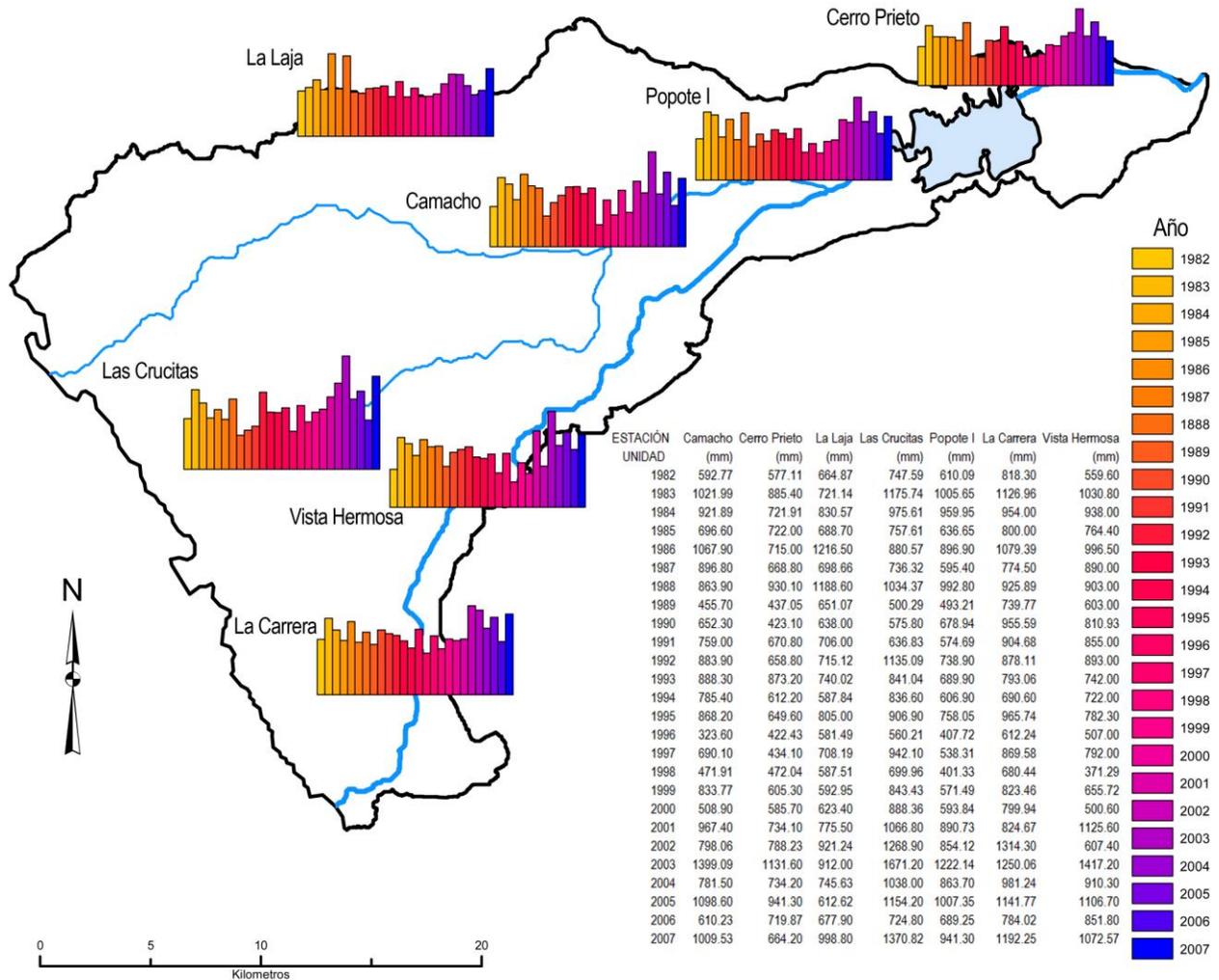


Figura 4.7 Precipitación Anual Acumulada 1982-2007 (CNA).

#### 4.3.1.1 Cálculo de la precipitación promedio sobre un área por el Método de Thiessen

Este método considera la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros, mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos. Las estaciones emplazadas en un mapa son conectadas por medio de líneas, las mediatrices de estas líneas forman polígonos alrededor de cada estación. Posteriormente, debe de medirse el área de cada polígono y se expresa su valor como porcentaje del total del área bajo análisis. El promedio ponderado de lluvias para el área

total se calcula multiplicando la precipitación de cada estación por su porcentaje de áreas asignado y realizando la sumatoria de estos valores. La Figura 4.8 presenta los polígonos de Thiessen calculados para el área de estudio, se presenta también la tabla de cálculo de la precipitación promedio sobre dicha área (Aparicio-Mijares, 2007; Campos-Aranda, 2007; Linsley *et al.*, 1977).

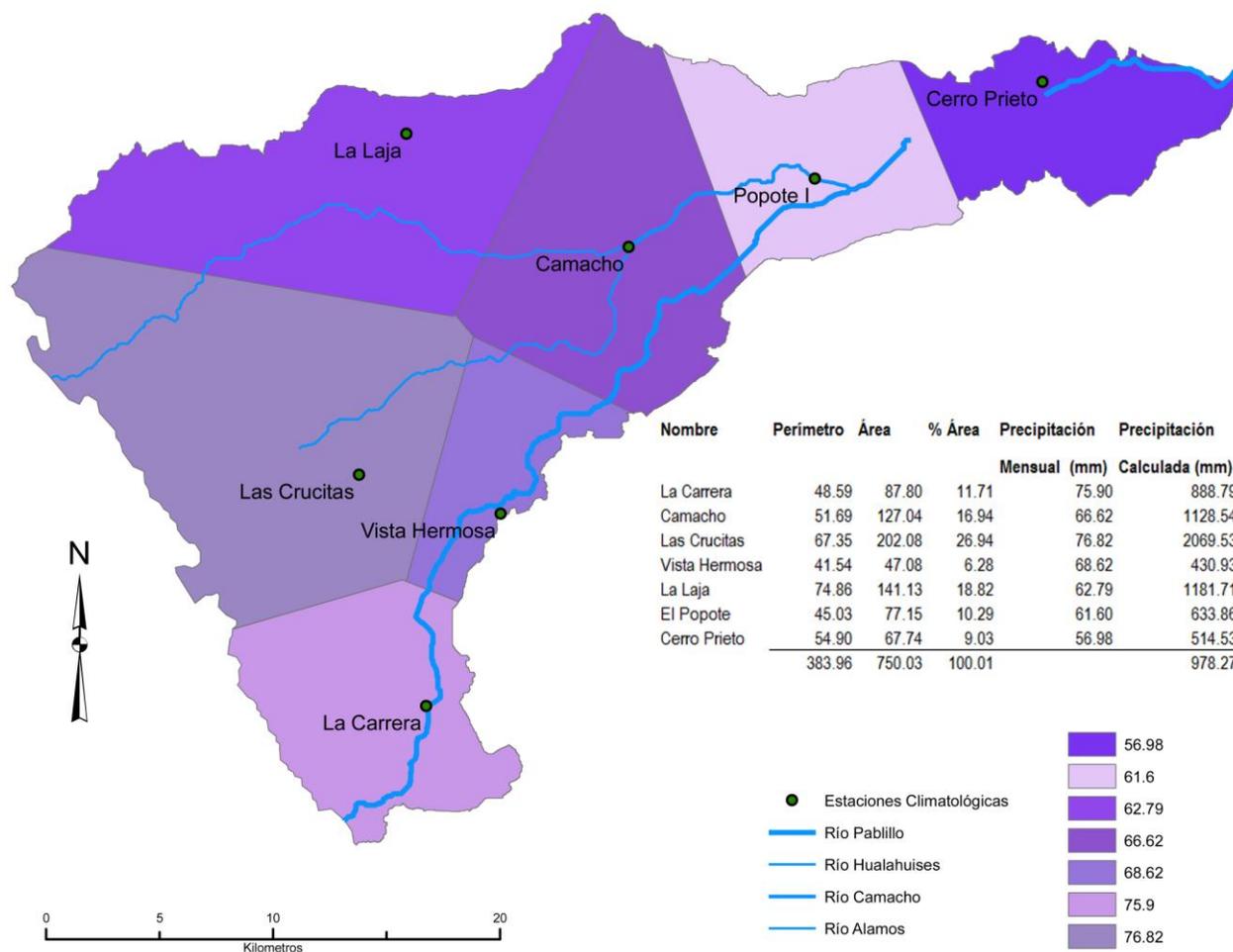


Figura 4.8 Cálculo de la precipitación promedio sobre el área de estudio (Método de Thiessen).

### 4.3.2 Temperatura

La Figura 4.9 presenta el registro mensual de temperatura media para las siete estaciones climatológicas en análisis, para el periodo comprendido entre 1982 y 2007, el valor medio registrado es de 22.26 °C.

Los valores de temperaturas máximas presentes en la zona y registradas entre los años 1982 a 2007 se evidencia que el valor máximo se registró en la estación climatológica Cerro Prieto durante el año 1998 alcanzado un valor de 48 °C (Figura 4.10).

Para el periodo de 25 años entre el año 1982 y el año 2007, se registró que la temperatura mínima en la zona es de -9 °C durante el año 1983, valor que fue medido en la estación Vista Hermosa (Figura 4.11).

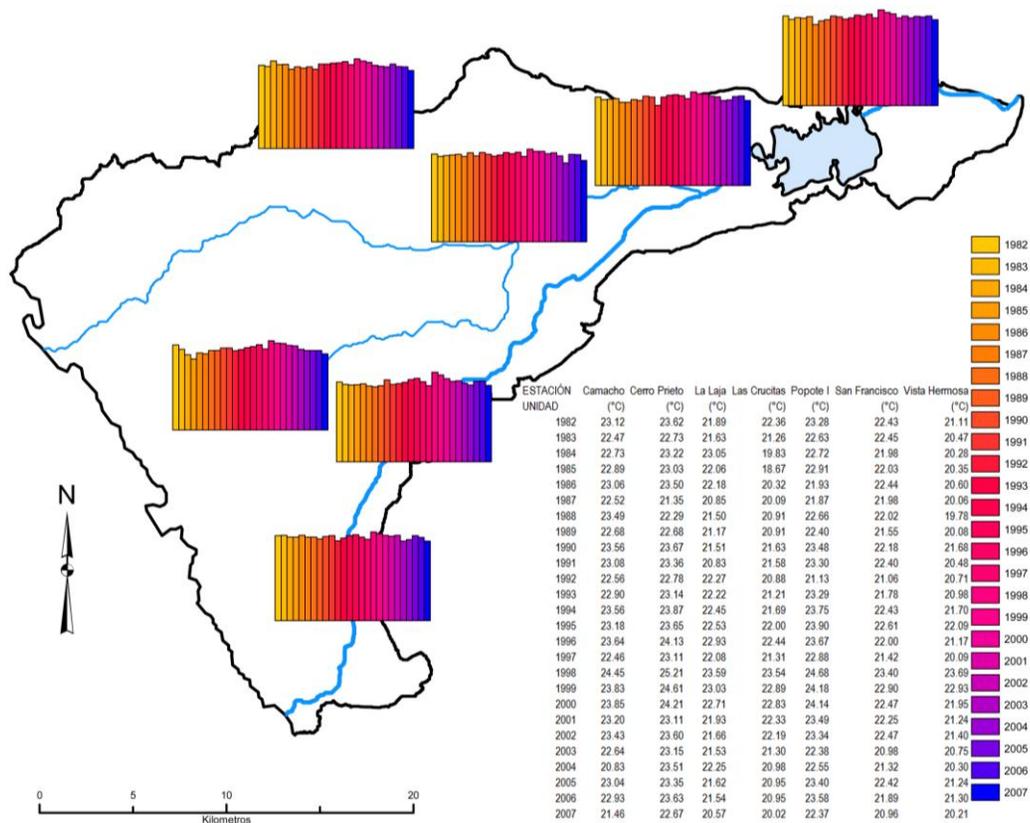


Figura 4.9 Temperatura Media Mensual 1982-2007 (CNA).

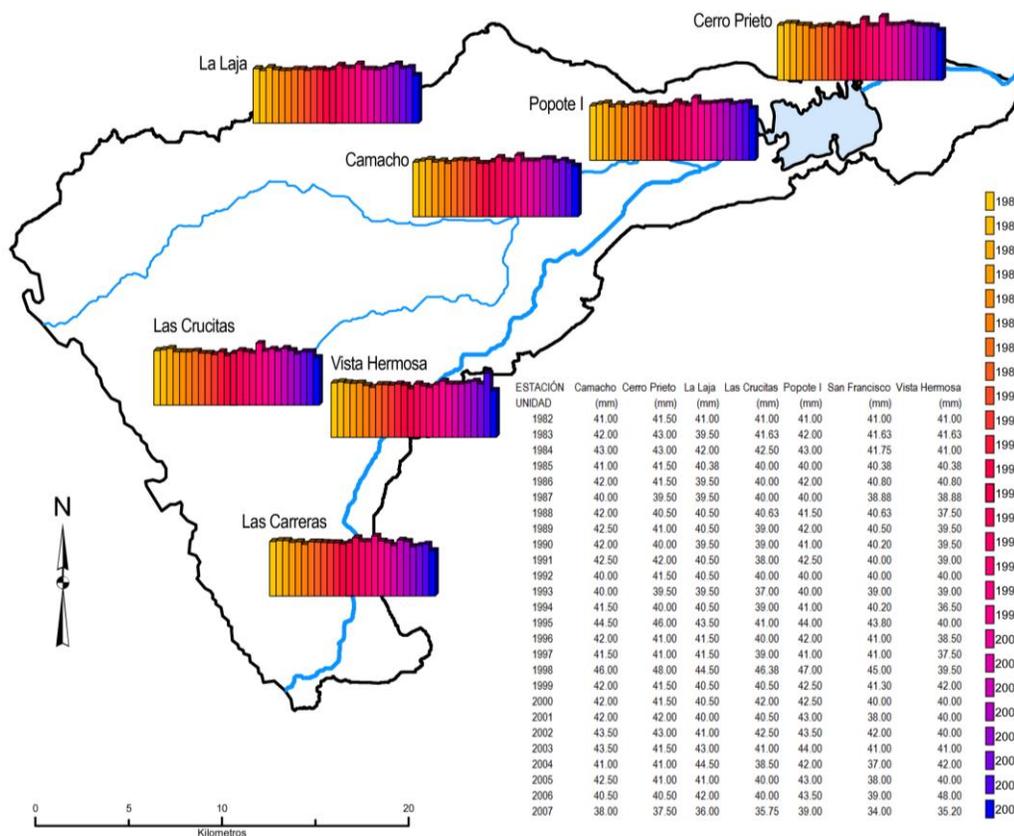


Figura 4.10 Temperatura Máxima Anual (CNA).

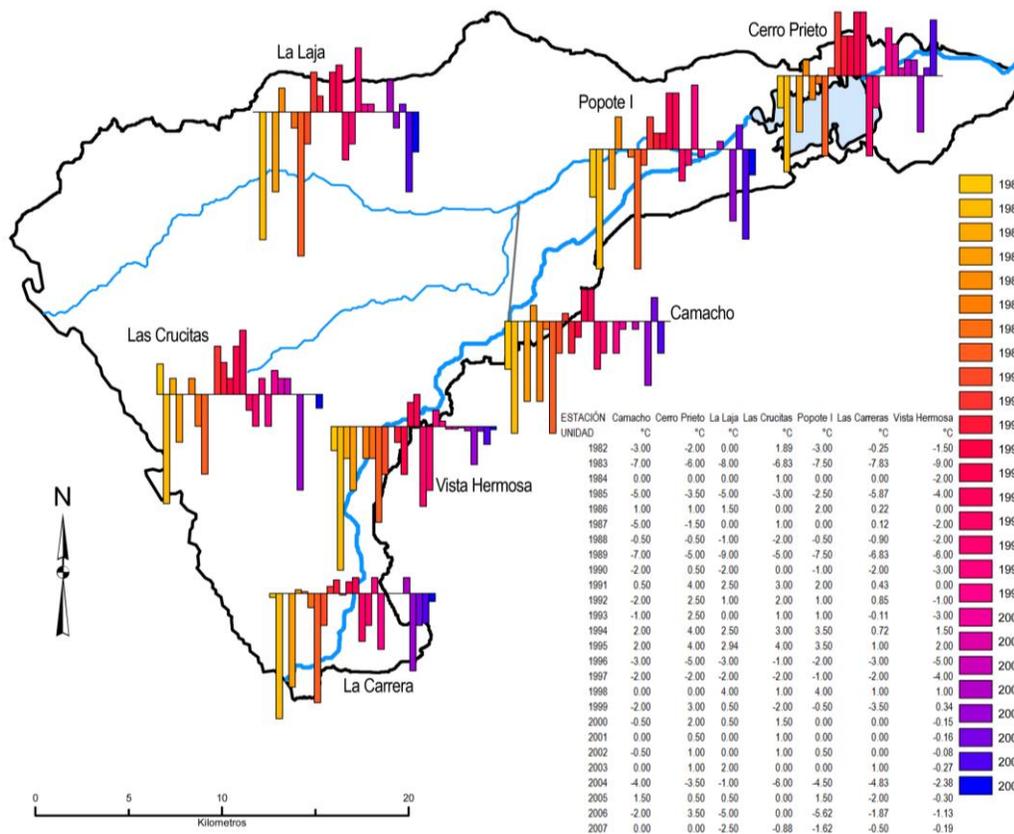


Figura 4.11 Temperatura Mínima Anual (CNA).

### 4.3.3 Evaporación y Evapotranspiración

La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, ríos y en el suelo (en las capas cercanas a su superficie), al estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera. Lo que interesa en este caso, es saber el flujo neto de partículas hacia la atmósfera (Aparicio-Mijares, 2007).

La evaporación puede medirse directamente por medio del uso de evaporímetros, estos equipos se encuentran instalados en las siete estaciones climatológicas al interior del área de estudio. La Figura 4.12 muestra los valores de evaporación media para el periodo comprendido entre 1982 y 2007. El valor medio mensual para este periodo de tiempo es de 143.70 mm.

La transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Está agua es tomada por las plantas directamente del suelo. La evapotranspiración es la combinación de la evaporación y la transpiración combinadas, la cual para casos específicos puede ser calculada por medio de la aplicación del modelo sugerido por Blaney-Criddle (SRH, 1972), la aplicación de este método al área de estudio se detalla a continuación.

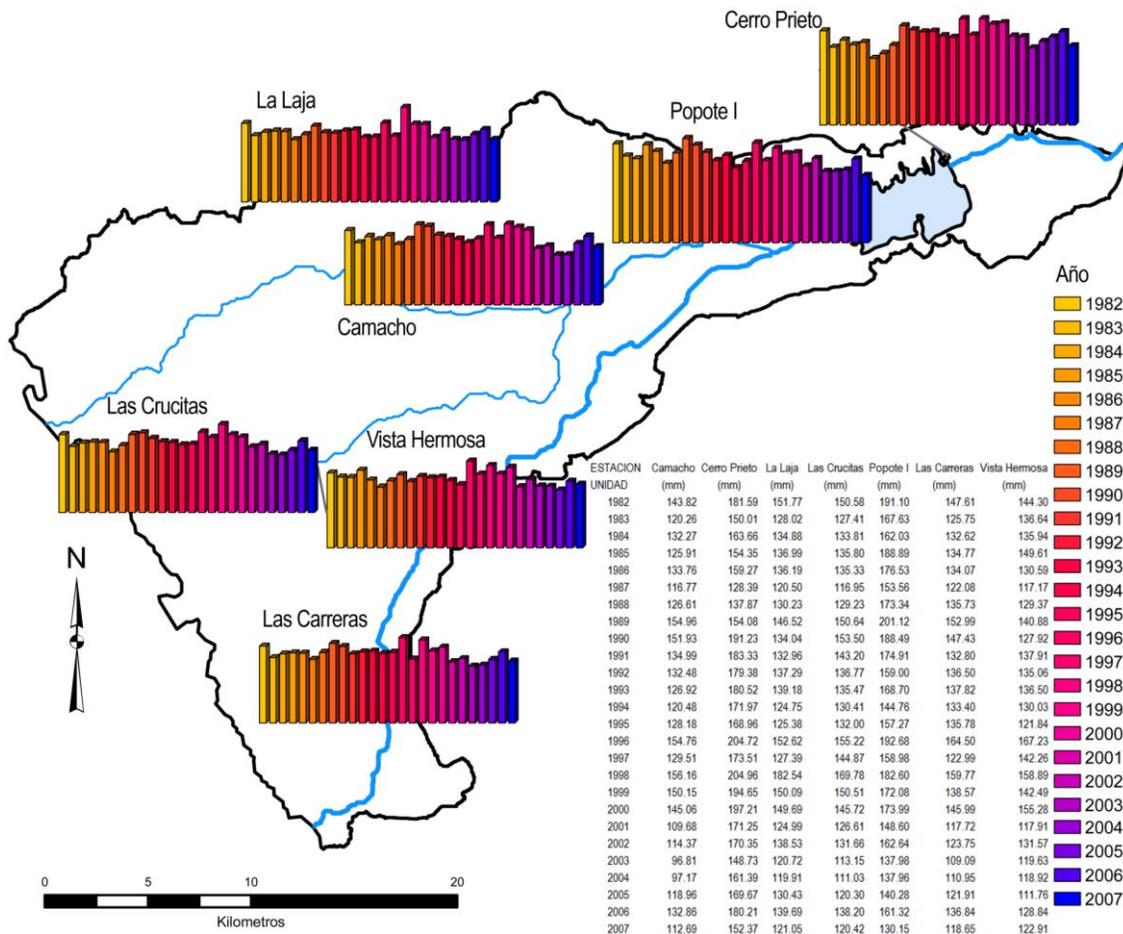


Figura 4.12 Evaporación Media Anual (CNA).

Las variables que se toman en cuenta son: la temperatura, las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración del ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona en que se encuentra la plantación. El ciclo vegetativo de un cultivo es el tiempo comprendido entre la siembra y la cosecha, para estimar la evapotranspiración de este periodo se usa las siguientes formulas:

$$E_r = K_g F \quad (4.9)$$

El valor de  $K_g$ , para cultivo de cítricos varía entre 0.50 a 0.65 y se consideran de 7 a 8 meses como periodo vegetativo, datos obtenidos (Aparicio-Mijares, 2007) pagina 58. El factor de temperatura y luminosidad F, se calcula por medio de:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \quad (4.10)$$

Donde, n es el número de meses del ciclo vegetativo.

$$f_i = P_i \left( \frac{T_i + 17.8}{21.8} \right) \quad (4.11)$$

Donde:

$P_i$  = porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año.

$T_i$  = temperatura media del mes i en °C.

Los datos de  $P_i$  fueron obtenidos de (Aparicio-Mijares, 2007), pagina 60, donde se consideran 25° de latitud norte y considerándose de marzo a octubre como periodo vegetativo, obteniéndose los valores presentados en la Tabla 4.3:

**Tabla 4.3** Porcentaje de horas de sol

MES	Pi
Marzo	8.39
Abril	8.61
Mayo	9.33
Junio	9.23
Julio	9.45
Agosto	9.09
Septiembre	8.32
Octubre	8.09

**Fuente:** Datos tomados de Tabla 4.4 (Aparicio-Mijares, 2007)

Los valores medios de temperatura media mensual fueron calculados para el periodo entre 1982 y 2007, los cuales son presentados en la Tabla 4.4. Considerando un valor para  $K_g = 0.65$  y reemplazando valores de las tablas 4.3 y 4.4 en las ecuación 4.7, se obtiene:

$$E_t = 90.27 \text{ mm}$$

**Tabla 4.4** Temperatura Media Mensual periodo 1982-2007

<b>MES</b>	<b>Ti (°C)</b>
Marzo	20.14
Abril	23.40
Mayo	26.16
Junio	27.77
Julio	26.09
Agosto	28.36
Septiembre	25.86
Octubre	22.52

**Fuente:** Base de datos de CNA.

#### 4.3.4 Hidrometría de la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo

Se tienen seis estaciones hidrométricas al interior del perímetro del área de estudio. Los datos de caudal están publicados en millones de metros cúbicos ( $\text{Mm}^3$ ). Las Figuras 4.13 a 4.16 presentan la información detallada para el periodo 1982 a 2007.

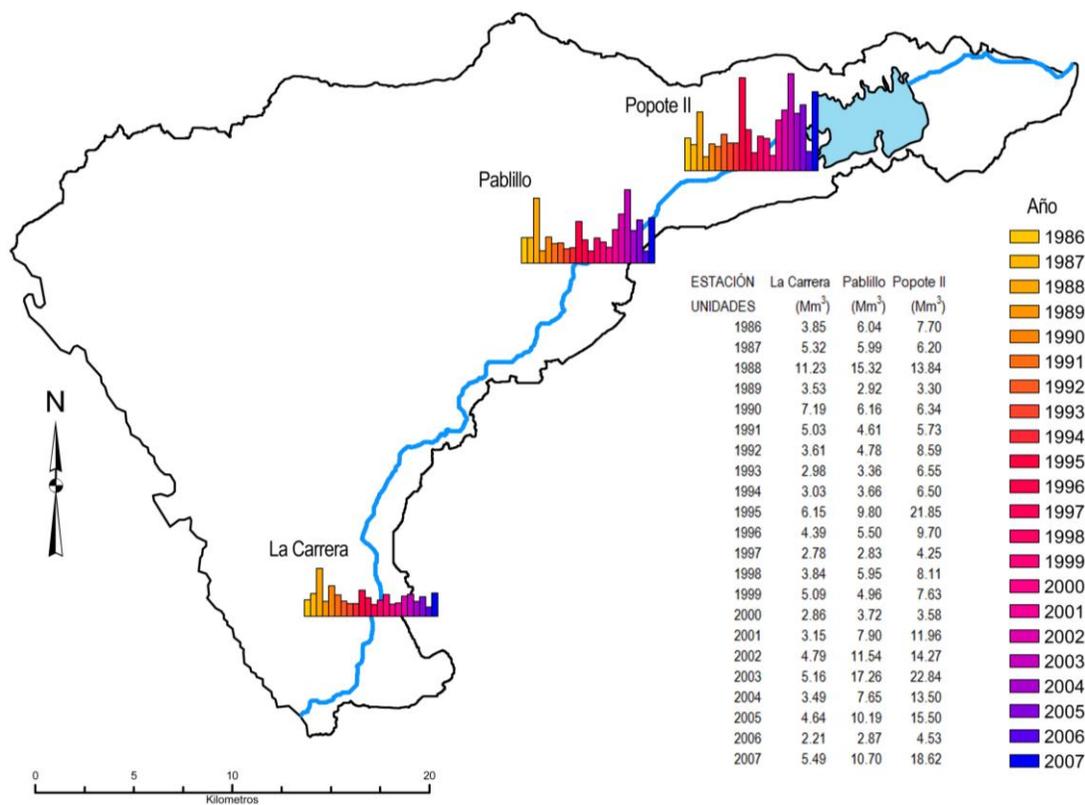


Figura 4.13 Caudal Medio río Pablillo (CNA).

El volumen medio que circuló por el río Pablillo en el periodo comprendido entre el año 1986 y año 2007 tiene un valor de  $7.19 \text{ Mm}^3$  (Figura 4.13).

El año que transportó mayor caudal fue el 2003, con un total acumulado de  $543.105 \text{ Mm}^3$ , año en el que la estación el Popote II alcanzó su máximo valor anual acumulado de  $274.08 \text{ Mm}^3$ , mientras que los máximos valores para las estaciones La Carrera ( $134.83 \text{ Mm}^3$ ) y Pablillo ( $183.88 \text{ Mm}^3$ ) se registraron en el año 1988, como se muestra en la Figura 4.14.

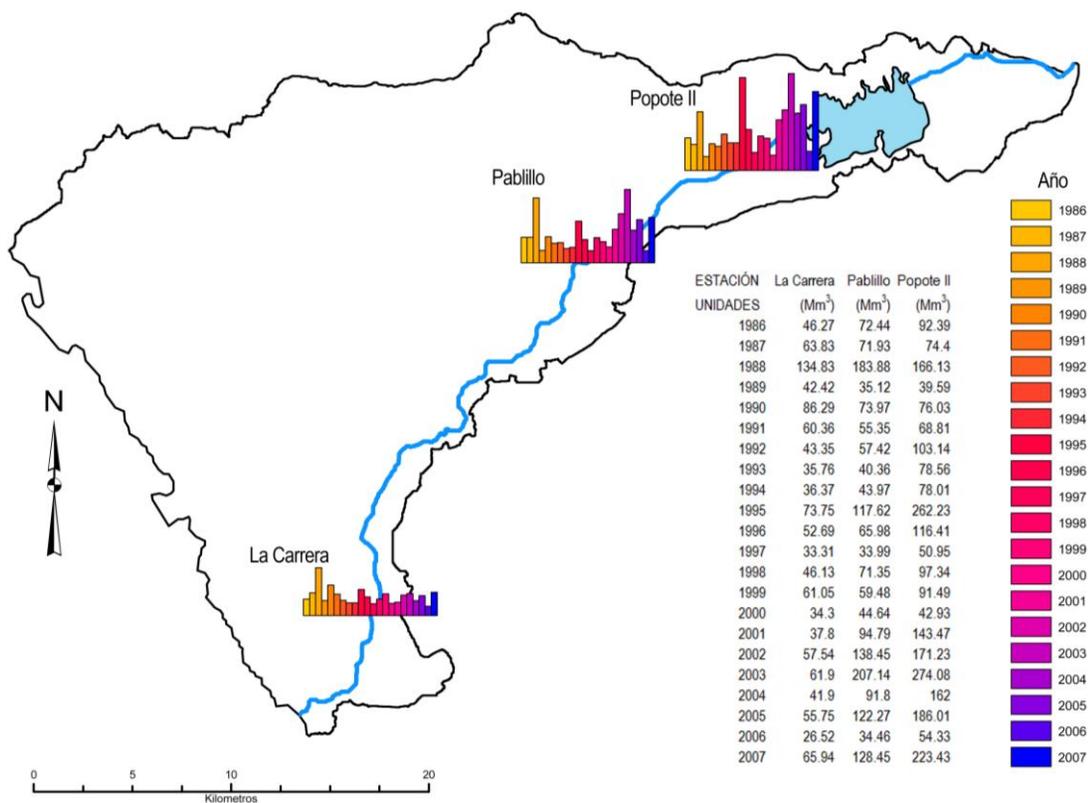


Figura 4.14 Caudal Acumulado río Pabillillo (CNA).

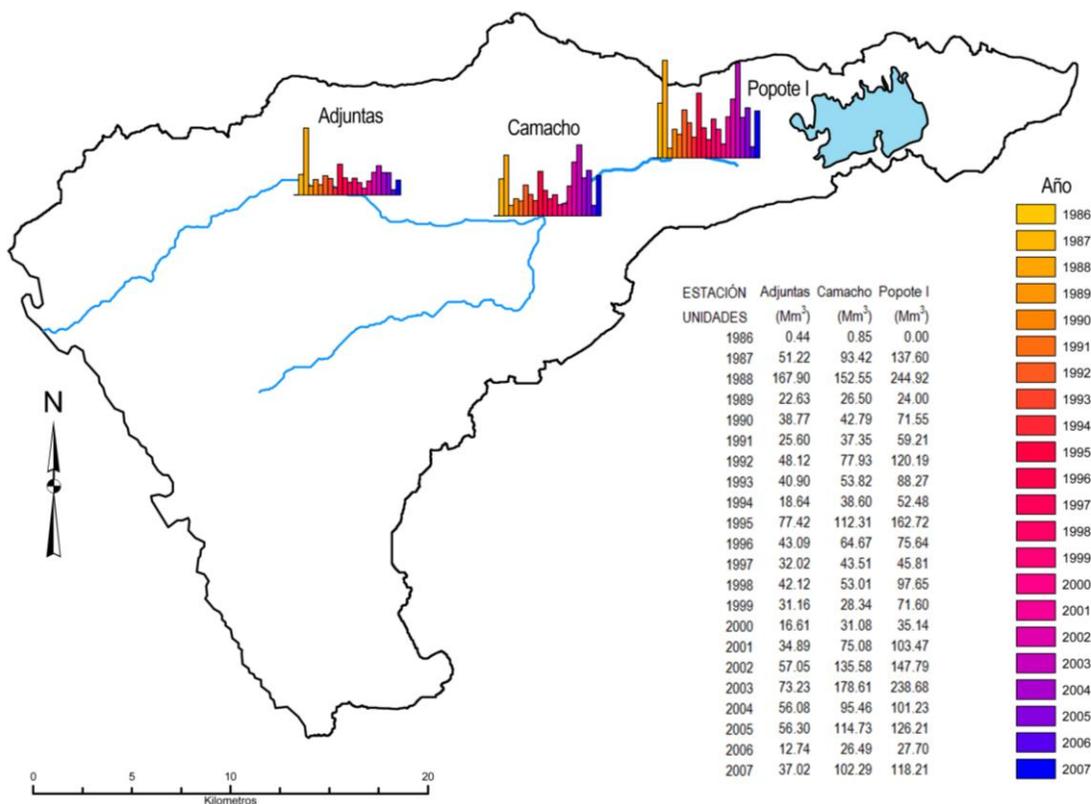


Figura 4.15 Caudal Medio ríos Hualahuises y Camacho (CMA).

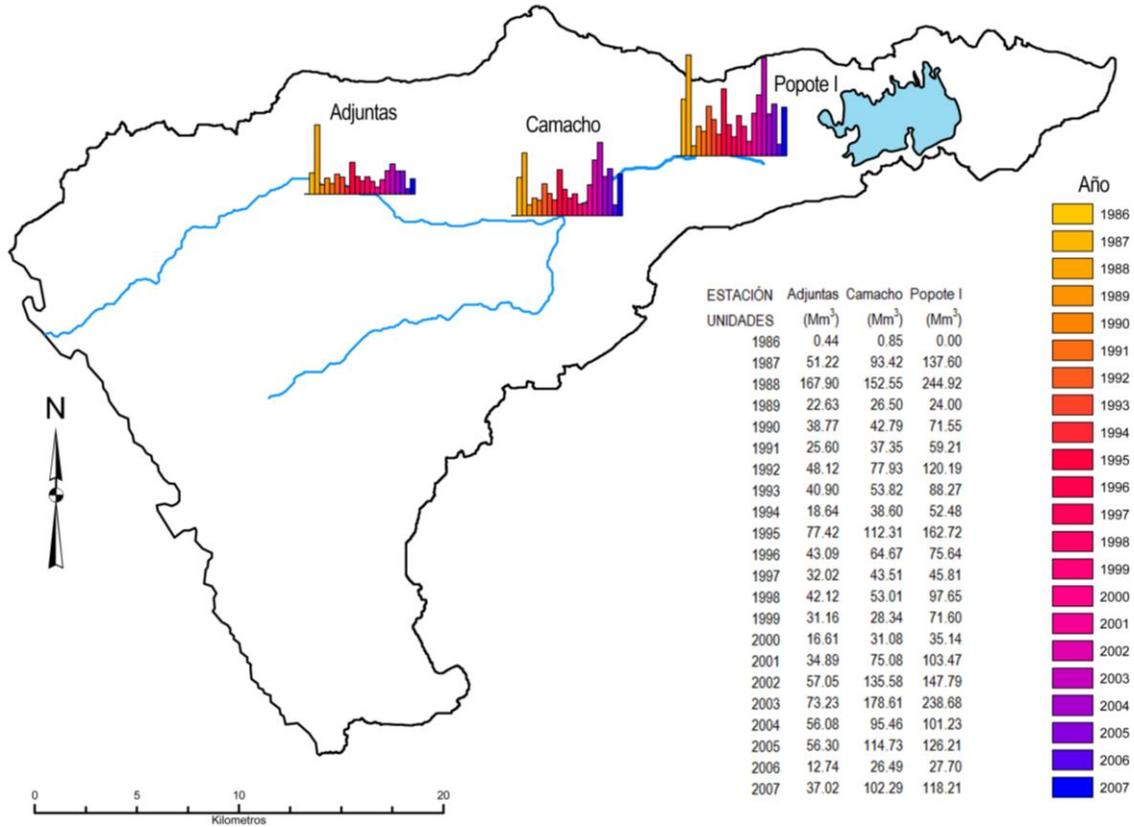


Figura 4.16 Caudal Acumulado ríos Hualahuises y Camacho (CNA).

Los datos registrados para los ríos Hualahuises, Camachito y Camacho, reflejan que 6.31 Mm<sup>3</sup> fluyen como volumen promedio para los años 1986 y 2007 Figura 4.15.

Finalmente, los volúmenes acumulados para los ríos tributarios (Hualahuises, Camachito y Camacho) indican que el año con mayor volumen transportado fue el 1988 con un total de 565.37 Mm<sup>3</sup>, donde en el río Hualahuises se registró un volumen de 167.90 Mm<sup>3</sup>, en la estación Camacho (unión de los ríos Hualahuises y Camachito) se registro un caudal de 152.55 Mm<sup>3</sup>, y en la estación Popote I (río Camacho), se registro un valor total de 244.92 Mm<sup>3</sup> (Figura 4.16).

#### 4.4 ESTIMACIÓN DE DEMANDAS

El cálculo de los volúmenes de aprovechamiento hídrico, representan sin duda alguna una variable preponderante a la hora de analizar un sistema sostenible de aprovechamiento del recurso agua. La determinación de los requerimientos para el área de investigación se realizó de manera particular para los tres grupos extractivos principales: Doméstico-Urbano, Industrial y Agrícola.

#### 4.4.1 Uso Doméstico y Urbano

Los usos de agua en el sector domestico-urbano contemplan varios fines, los más importantes vienen detallados en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Requerimientos típicos de agua para uso Domestico-Urbano

Propósito	Requerimiento típico de agua
Agua para consumo humano	2.5 litros persona/día
Preparar y cocinar comida	10 litros persona/día
Higiene	25 litros persona/día
Volumen mínimo de suministro de agua al día para las personas	20 litros persona/día
Volumen de agua potable mínima necesaria para beber e higiene en zonas de desarrollo	10 litros persona/día
Lavanderías comerciales	500 litros por 1000 kg
Hoteles	200 litros por residente al día
Garajes	500 litros por empleado al día
Locales al por menor	100 litros por empleado al día

**Fuente:** Valores tomados de Younger (2007)

#### 4.4.2 Uso Industrial

Los usos en el sector industrial están clasificados de acuerdo a la actividad que desarrollan, la Tabla 4.6 muestra los volúmenes requeridos por los principales tipos de industrias.

**Tabla 4.6** Requerimientos típicos de agua para uso Industrial

Propósito	Requerimiento típico de agua
Fabricación de acero	0.1 Megalitro por tonelada de acero producido
Petroquímica	0.5 Megalitro por tonelada producida
Otras industrias	>5,000 litros por tonelada producida
Cervecerías	2.5 litros de agua por litro de cerveza
Procesamiento de comida	10,000 litros por tonelada de producto

**Fuente:** Valores tomados de Younger (2007)

### 4.4.3 Uso Agrícola

La agricultura es una de las actividades humanas que mayores volúmenes de agua requiere. Estos volúmenes dependen de la posición geográfica de la zona del cultivo, los tipos de suelo y el tipo de plantaciones predominantes de la zona en consideración. La Tabla 4.7 muestra los volúmenes requeridos para el cultivo de cítricos para el área de estudio.

**Tabla 4.7** Requerimientos típicos de agua para uso Agrícola

Propósito	Requerimiento típico de agua
Cultivo de Naranja	6,000 a 7,000 m <sup>3</sup> /ha por periodo vegetativo
Cultivo de Limón	9,000 a 12,000 m <sup>3</sup> /ha por periodo vegetativo

**Fuente:** Valores tomados de [www.infoagro.com/citricos/naranja.htm](http://www.infoagro.com/citricos/naranja.htm); [www.infoagro.com/citricos/limon.htm](http://www.infoagro.com/citricos/limon.htm)

### 4.5 PRESA JOSÉ LÓPEZ PORTILLO (CERRO-PRieto)

La demanda de agua para la ciudad de Monterrey en 1979 estaba estimada en 734 millones de litros por día, pero solamente se abastecían 475 millones de litros al día, teniendo un déficit de 259 millones. Por tal motivo de desarrollo el plan hidráulico para Nuevo León donde se plantearon Sistemas Santiago II, Región Linares – Monterrey y Monterrey IV, definiéndose las siguientes obras en etapas: Presa Rodrigo Gómez/La Boca, la Presa José López Portillo/Cerro Prieto y la Presa El Cuchillo – Solidaridad como etapa final del Plan Hidráulico de Nuevo León (De León-Gómez *et al.*, 1994). Actualmente, se viene desarrollando una ampliación del sistema de captación Buenos Aires en el municipio de Santa Catarina.

La Presa Cerro se construyó para cumplir con los objetivos de proveer agua a la ciudad de Monterrey y su área metropolitana con un suministro de 4.1 m<sup>3</sup>/s, irrigar una superficie de 673 hectáreas y tener un control del afluente en los ríos de la localidad. Su etapa de construcción abarcó de los años 1980 – 1982, siendo el proyecto más grande de abastecimiento de agua potable en México (De León-Gómez y Schetelig, 1996; De León-Gómez *et al.*, 1994)

Para realizar el balance hidrológico del vaso de la presa se analizó por una parte las entradas medias anuales (escurrimiento y precipitación) y por otra parte las salidas medias anuales (suministros, evaporación y filtraciones). Se calcularon tres diferentes fases, dependiendo de la frecuencia de las condiciones climatológicas irregulares de la región en estudio, es decir años lluviosos, normales y secos. Para fase con huracanes, se obtuvo un suministro medio de ~5.58 m<sup>3</sup>/s y un volumen de almacenamiento de 176 Mm<sup>3</sup>/a. Segunda fase con precipitaciones fuertes, se obtuvo un suministro medio ~3.68 m<sup>3</sup>/s y un almacenamiento de 116 Mm<sup>3</sup>/a. La tercera fase para

años secos sin precipitaciones fuertes con un suministro  $\sim 2.41 \text{ m}^3/\text{s}$  y un volumen almacenado de  $76 \text{ Mm}^3/\text{a}$  (De León-Gómez, 1993; De León-Gómez *et al.*, 2006).

Esta presa tiene una capacidad de almacenamiento igual a  $393 \text{ Mm}^3$ , el vaso de la presa cubre una superficie de  $36 \text{ km}^2$  a una cota de 285.5 m.s.n.m. se compone de una cortina y siete diques de materiales graduados con corazón de arcilla, filtros de arena, zonas de transición de gravas y arenas, así como paramento de bloques de roca. Su altura máxima es de 50 m. Este reservorio de agua ha brindado grandes beneficios para el AMM aportando continuamente un gasto medio anual de  $2.61 \text{ m}^3/\text{s}$  en promedio, desde su construcción, es decir un 30% del abastecimiento total que recibe el AMM. Sin embargo, este suministro no cumple con la cantidad de diseño original, esta situación se debe a la fluctuación en la frecuencia e intensidad de huracanes y la continua pérdida por evaporación y filtración en el mismo vaso de la presa (De León-Gómez, 1993; De León-Gómez *et al.*, 1994).

#### 4.6 CONCLUSIONES

Se generó un modelo digital de elevaciones para el área de estudio por medio de la interpolación de  $\sim 95,000$  puntos georeferenciados utilizando el módulo "Toppo to Raster", que es el más adecuado para crear digitalmente relieves topográficos hidrológicamente correctos basándose en el programa ANUDEM.

La CHRP tiene un área de  $1665.08 \text{ Km}^2$  y que tiene un perímetro de  $354.36 \text{ km}$ , por lo tanto se cataloga como una cuenca hidrológica de tamaño Intermedio-Grande con una altitud media de  $1,056.33 \text{ m.s.n.m.}$

La CHRP es una cuenca de tipo exorréica, el orden de corrientes es 4, tiene una red dendrítica en las cabeceras del río Pablillo, en la zona de la SMO, la red de cauces es rectangular enrejado y en la PCGM se presentan cauces de tipo dendrítico sub-paralelo.

El colector principal de la cuenca es el río Pablillo, que tiene una longitud de  $89.17 \text{ km}$ . En total se tienen 52 cursos de agua incluyendo los 12 tramos que componen el colector principal. Por su posición topográfica, la parte occidente del río se considera de montaña y la parte oriente como río de transición, tomando como referencia el frente de la SMO.

Se analizó y completo estadísticamente la base de datos de precipitación, temperatura y evaporación de una serie de 25 años (1982-2007), para la hidrometría de los ríos se consideró el periodo de tiempo entre los años 1986-2007.

La precipitación máxima de la serie se registro en Las Crucitas en 1989 (534 mm), la precipitación media de la zona por el método aritmético tiene un valor de 1035.64 mm, y por el método de los polígonos de Thiessen nos da un valor de 978.27 mm.

La temperatura media anual para el periodo comprendido entre 1982 y 2007 es igual a 22.26 °C. La temperatura máxima para la serie de datos se registró en Cerro-Prieto en el año 1998 alcanzado un valor de 48 °C y la temperatura mínima en la zona de -9 °C durante el año 1983, medidos en la estación Vista Hermosa (Figura 4.11).

El valor medio mensual de la evaporación es de 143.70 mm y la evapotranspiración del ciclo vegetativo es igual a 90.27 mm, representado un volumen total evaporado de 1814.67 mm al año. Con lo cual el déficit hídrico en la CHRP es de ~780 mm.

El volumen medio transportado por el río Pabllillo (1986-2007) tiene un valor de 7.19 Mm<sup>3</sup>, el año que transportó mayor caudal fue el 2003, con 543.105 Mm<sup>3</sup>, ríos Hualahuises, Camachito y Camacho, tienen un volumen medio de 6.31 Mm<sup>3</sup> y el año con mayor volumen transportado fue el 1988 con un total de 565.37 Mm<sup>3</sup>.

La presa Cerro – Prieto, fue el proyecto de captación hídrica con fines de abastecimiento de agua potable más grande de México (1979), actualmente provee casi el 30% del volumen necesario para abastecer la población de la Zona Metropolitana de Monterrey.

## 5. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

### 5.1 INTRODUCCIÓN

La hidrogeología puede ser definida como la ciencia que estudia la ocurrencia, distribución y movimiento del agua subterránea (AS) bajo de la superficie de la Tierra. Abarca la relación entre los materiales geológicos y los procesos con el agua. En 1856, el ingeniero hidráulico francés Henry Darcy (1803-1858) estudió el movimiento del agua a través de la arena definiendo la relación conocida como Ley de Darcy que gobierna el flujo de AS en la mayoría de los materiales aluviales y sedimentarios (Fetter, 2001; Todd y Mays, 2005).

Desde fines del siglo XIX y durante todo el siglo XX se realizaron importantes avances en materia de hidrogeología, los autores más relevantes son: J. Boussinesq, G.A. Daubrée, J. Dupuit, P. Forchheimer, A. Thiem, A. Hazen, F.H. King, los cuales aportaron al conocimiento por medio de trabajos de campo y teóricos. Durante los últimos 40 años se produjo el desarrollo más importante en la investigación hidrogeológica, debido a que, en las universidades surge la investigación relacionada al AS, el establecimiento de firmas especializadas en AS, el advenimiento de las computadoras, así como el extensivo desarrollo de software han elaborado conjuntamente una sólida y competitiva base para el desarrollo y gestión de los recursos de aguas subterráneas (Todd y Mays, 2005).

La fisiografía, la geología superficial, la topografía de las cuencas de drenajes y la vegetación influyen la relación sobre la precipitación en la cuenca y el agua que drena de ella. El agua que fluye por los ríos y el AS son agentes geológicos que ayudan a dar forma a la superficie terrestre, por lo cual realizar una separación tajante de la hidrología e hidrogeología no es útil. La capacidad para interactuar con el medio y la distribución espacial del flujo son las principales características del AS (Fetter, 2001; Hiscock, 2005; Tóth, 1999).

La hidrogeología aplicada integra la ocurrencia geológica del agua con la descripción matemática de su movimiento, su estado químico y las actividades del hombre. Resultados típicos de investigaciones de hidrogeología aplicada pueden ser: planes de abastecimiento de AS, determinación de una zona de explotación, delimitación de zonas de riesgo de un campo de pozos

para protegerlos contra la contaminación, evaluaciones del impacto de descarga de cuerpos de agua superficial y delineación de plumas contaminantes en el AS (Fetter, 2001).

Físicamente, el flujo de AS en el subsuelo está determinado por la permeabilidad de las Formaciones geológicas y la interacción con el agua de la superficie. El subsuelo no es visible, por lo tanto es común que el público en general no sepa que es lo que fluye por debajo de la superficie. Sin embargo, es bien sabido que se pueden perforar pozos y encontrar agua lo cual ha permitido el asentamiento de centros urbanos en muchas regiones del mundo (Zaadnoodijk *et al.*, 2004).

La geoquímica del AS, trata de los procesos que controlan la composición química del AS que determinan su calidad. La calidad del AS condiciona el aprovechamiento de este recurso, calidad que puede cambiar durante la explotación o puede ser afectada por las actividades humanas y sus impactos que no siempre son inmediatamente evidentes. El interés de la sociedad en el AS, es principalmente asegurar su buena calidad que se destina al consumo humano, por tal motivo, preservar la buena calidad del AS es de alta importancia para las autoridades ambientales (Appelo y Postma, 2005).

Para que una ciudad sea hidrológicamente sostenible, es necesario establecer un equilibrio que sea aceptable para el drenaje, inundaciones, eliminación de aguas residuales y suministro de agua, inclusive si no se explota AS, esta realidad es evidente por los continuos impactos del pasado donde el desarrollo en la explotación del recurso no administrado ha tenido un impacto negativo en los niveles y en la calidad del agua de muchas ciudades, la consideración de calidad y cantidad de agua no es una tarea trivial porque limita el desarrollo del entorno (Tellam *et al.*, 2006).

En términos hídricos, la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo (CHRP), actualmente está caracterizada por la sobreexplotación de los acuíferos presentes al interior de su perímetro, situación que se debe a las condiciones climatológicas dominantes en el área (clima árido-semiárido) donde existen periodos cortos de precipitación, lluvias torrenciales y extracciones continuas de AS (CNA, 2007b).

El emplazamiento y desarrollo de las ciudades de Linares y Hualahuises y las comunidades ejidales al interior de la CHRP impactan el sistema hidrológico natural. Por tanto, es necesario determinar el comportamiento hidrogeológico del AS (zonas de recarga, niveles piezométricos, direcciones de flujo del AS, entre otros parámetros) y determinar su calidad química, para lograr obtener un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico.

## 5.2 HIDROESTRATIGRAFÍA

Los modelos conceptuales de los sistemas hidrogeológicos, tienen como requisitos el conocimiento del medio geológico y sus propiedades hidráulicas, la combinación de estos parámetros en las Formaciones geológicas definen las unidades hidroestratigráficas del área de estudio (Navarro-De León, 2005; Seaber, 1988).

Se distinguen dos unidades hidroestratigráficas dominantes en el área de estudio, un acuífero de fracturas que se encuentra aflorando en la mayor parte del área (hacia el oeste y el norte), constituido por lutitas de la *Formación Méndez* y calizas-lutitas-margas de la *Formación San Felipe*; y un acuífero de poros constituido por materiales aluviales y conglomerados, que rellenan las depresiones de las Formaciones inferiores ocasionadas por la deformación Laramide acontecida en el Noreste de México. Por su gran espesor (más de 800 m) se considera que la *Formación Méndez* a profundidades mayores 200 metros se comporta como acuífero.

La Figura 5.1 muestra la distribución en planta de las unidades hidroestratigráficas, donde se presenta predominancia del acuífero de fracturas en las zonas suroeste, oeste, noroeste y norte, esta distribución puede deberse a que no existen cursos superficiales de agua importantes en estos sectores, por otra parte, no existen grandes diferencias en el nivel topográfico, lo cual es un indicador de menor deformación de las *Formaciones Méndez* y *San Felipe* en éstas zonas.

La predominancia del acuífero de poros en la zona central, sur y sureste, puede deberse a los materiales erosionados en la Sierra Madre Oriental (SMO) y que fueron transportados por los paleocanales permitiendo la formación de terrazas aluviales y conglomerados en las márgenes de los antiguos canales y actuales ríos.

La Figura 5.2, representa la morfología del límite superior de las *Formaciones Méndez* y *San Felipe* (unidad hidroestratigráfica caracterizada por fracturamiento), en muchos sectores esta superficie aflora en la superficie. El cálculo de este límite estratigráfico se generó integrando y procesando información de investigaciones anteriores en materia de geología, geofísica e hidrogeología (De la Garza-González, 2000; De León-Gómez, 1993; Galván-Mancilla, 1996; Izaguirre-Valdez, 2008; Montalvo-Arrieta *et al.*, 2005; Prado-Gómez, 1997; Quintanilla-López, 2005; Rojas-Ruíz y Méndez-Delgado, 1986; Ruíz-Martínez, 1990; Ruíz-Martínez y Werner, 1997; Yutsis *et al.*, 2007; Yutsis *et al.*, 2009).

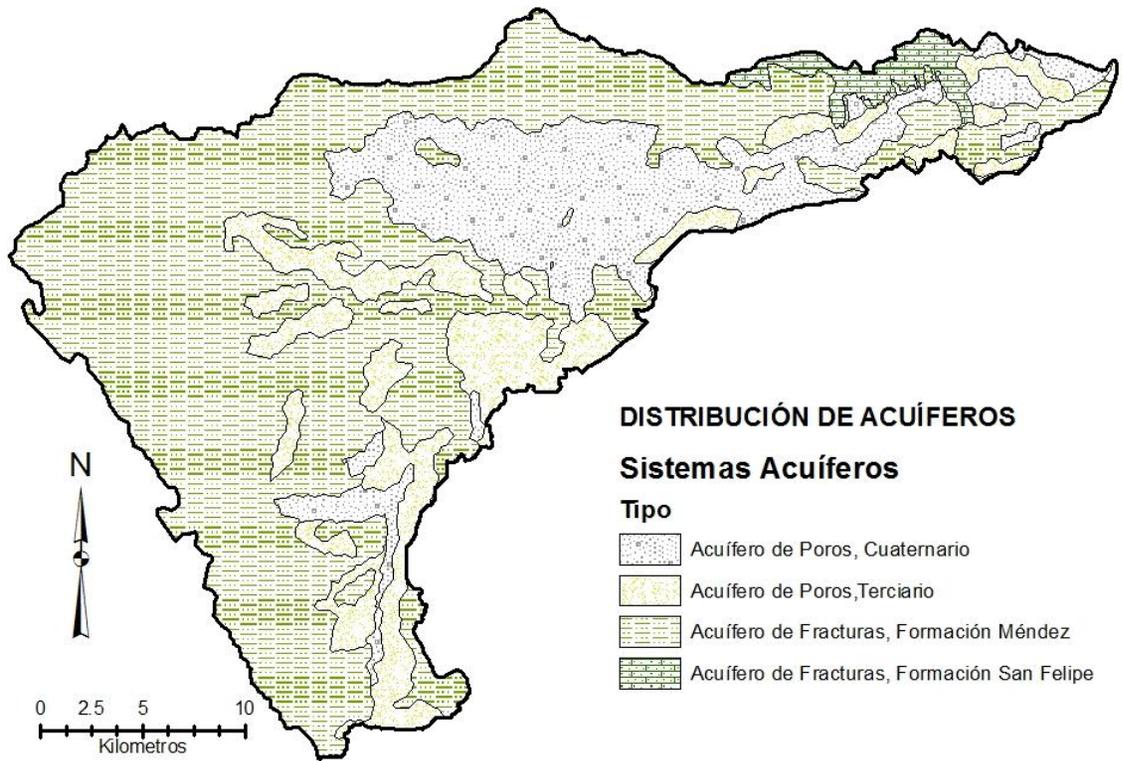


Figura 5.1 Distribución en planta de las unidades hidroestratigráficas.

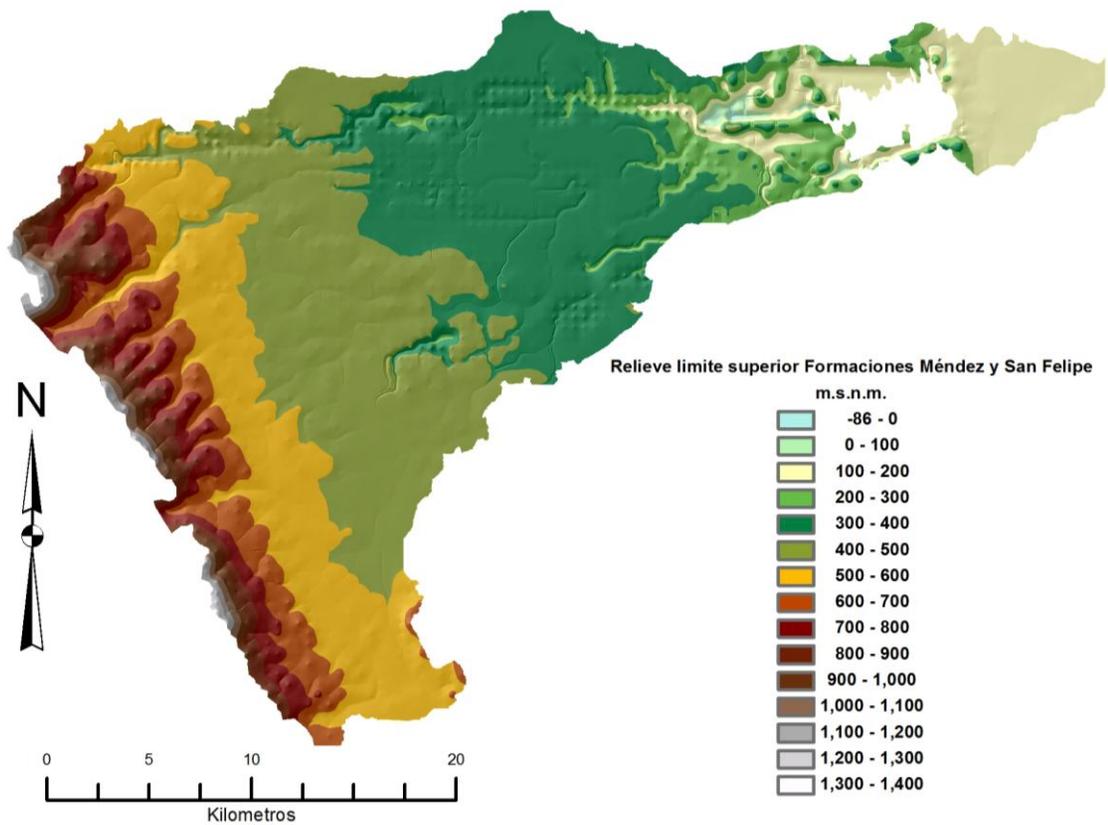


Figura 5.2 Representación morfológica de la base del acuífero de poros

La principal característica de este relieve es que existen depresiones en la zona este del área antes del lugar donde se encuentra la Presa Cerro-Prieto (PCP), también se puede evidenciar algunas depresiones topográficas en la zona central (sur y norte) donde las cotas indican posibles paleocauces de agua.

### 5.3 CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS

#### 5.3.1 Magnitud y Distribución de la Conductividad Hidráulica

Se recopiló información de pruebas de bombeo realizadas en anteriores investigaciones, donde los valores de conductividad hidráulica (CH) son variables (De la Garza-González, 2000; Drescher, 1995; Galván-Mancilla, 1996; Riecke, 1995).

Los resultados obtenidos en esas pruebas hidráulicas muestran variaciones significativas donde la CH engloba varios órdenes de magnitud. Las Tablas 5.1 y 5.2 muestran los valores de la CH.

**Tabla 5.1** Estudios de Bombeo realizados en pozos de la FCT en 1995.

	T (m <sup>2</sup> /s)	S	K (m/s)	Q (l/s)	Fecha	Ubicación
PAP-1	3.04 x 10 <sup>-4</sup>	0.0000275	2.28 x 10 <sup>-6</sup>	6.35	Nov-1992	Guadalupe
P-114	4.11 x 10 <sup>-3</sup>	0.00115	3.15 x 10 <sup>-4</sup>	8.3–8.7	Nov-1995	FCT
P-115	3.20 x 10 <sup>-3</sup>	0.000684	3.40 x 10 <sup>-4</sup>	8.3–8.7	Nov-1995	FCT
P-116	4.67 x 10 <sup>-4</sup>	0.000517	3.40 x 10 <sup>-4</sup>	8.3–8.7	Nov-1995	FCT
Ppx-1	8.41 x 10 <sup>-5</sup>	0.0014		3.10	Jul-1998	El Pretexto
Ppx-3				4.35	Jul-1998	El Pretexto
Ppx-4	4.50 x 10 <sup>-5</sup>	4.66		17.50	Jul-1998	El Pretexto
Ppx-5				7.00	Jul-1998	El Pretexto
Ppx-6	9.13 x 10 <sup>-5</sup>	0.15		8.24	Jul-1998	El Pretexto
Ppx-7	1.11 x 10 <sup>-5</sup>	0.63		1.18	Jul-1998	El Pretexto

Tomado de De la Garza-González (2000)

Para el acuífero de poros, las pruebas de bombeo se encuentran localizados en las zonas de La Petaca y el ejido Guadalupe. En el acuífero de grietas se han registrado valores muy variables donde el caudal varía desde nulo a 70 l/s indicando una gran diferencia de la capacidad de flujo en el acuífero.

**Tabla 5.2** Transmisividad de pozos evaluados en 1995.

Pozo	Transmisividad (m <sup>2</sup> /s)
B17	1.9 x 10 <sup>-4</sup>
P70	2.5 x 10 <sup>-4</sup>
P71	2.5 x 10 <sup>-4</sup>
P114	5.26 x 10 <sup>-3</sup>
P115	4.49 x 10 <sup>-4</sup>
P116	1.1 x 10 <sup>-3</sup>
P89	2.0 x 10 <sup>-3</sup>
P90	9.3 x 10 <sup>-4</sup>
P91	8.8 x 10 <sup>-4</sup>
P92	8.8 x 10 <sup>-4</sup>
P108	1.1 x 10 <sup>-2</sup>
P109	1.0 x 10 <sup>-2</sup>
B146	7.57 x 10 <sup>-4</sup>
B147	3.51 x 10 <sup>-3</sup>
P102	1.26 x 10 <sup>-3</sup>
P103	3.93 x 10 <sup>-3</sup>
B169	3.93 x 10 <sup>-2</sup>
B170	6.23 x 10 <sup>-4</sup>
B171	7.64 x 10 <sup>-4</sup>

Tomado de Galván (1996)

Se tomaron 18 ensayos de bombeo realizados en el área de estudio por Drescher (1995) y Riecke (1995), obteniendo resultados del parámetro de transmisividad donde los valores mayores son de  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (Huerta La Japonesa y Centro Recreativo de Hualahuises) que corresponden al acuífero de poros del canal de gravas de la Terraza Baja T2 (Drescher, 1995; Galván-Mancilla, 1996; Riecke, 1995).

La media de transmisividad para el acuífero de poros es igual a  $1.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ , donde el gradiente hidráulico es de 0.005, dando gasto de  $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para el acuífero de fracturas la Transmisividad tiene un valor igual a  $8.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un gradiente hidráulico aproximado de 0.004, resultando un caudal de  $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ . La relación final de caudales entre ambos acuíferos es de 3 : 1, estos datos son validos para la sección comprendida entre la Huerta La Japonesa y el Centro recreativo de Hualahuises (Galván-Mancilla, 1996).

Como se evidencia en la Figura 5.12, la conductividad eléctrica (CE) se incrementa desde el suroeste y noroeste al noreste, donde los valores reportados después de los análisis de AS en laboratorio son 474 y 8,240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mínimo y máximo respectivamente. El valor máximo se encuentra en el tramo comprendido entre la ciudad de Linares y la PCP, por el resultado de la interpolación (Inverse Distance Weight) y el método de clasificación de valores (Natural Breaks) se presume que el valor más alto tiene un carácter puntual, siendo este el resultado de una alta mineralización o posible presencia de contaminantes producidos en los centros urbanos aguas arriba. La evolución de la CE que se determinó presenta una orientación poniente – oriente.

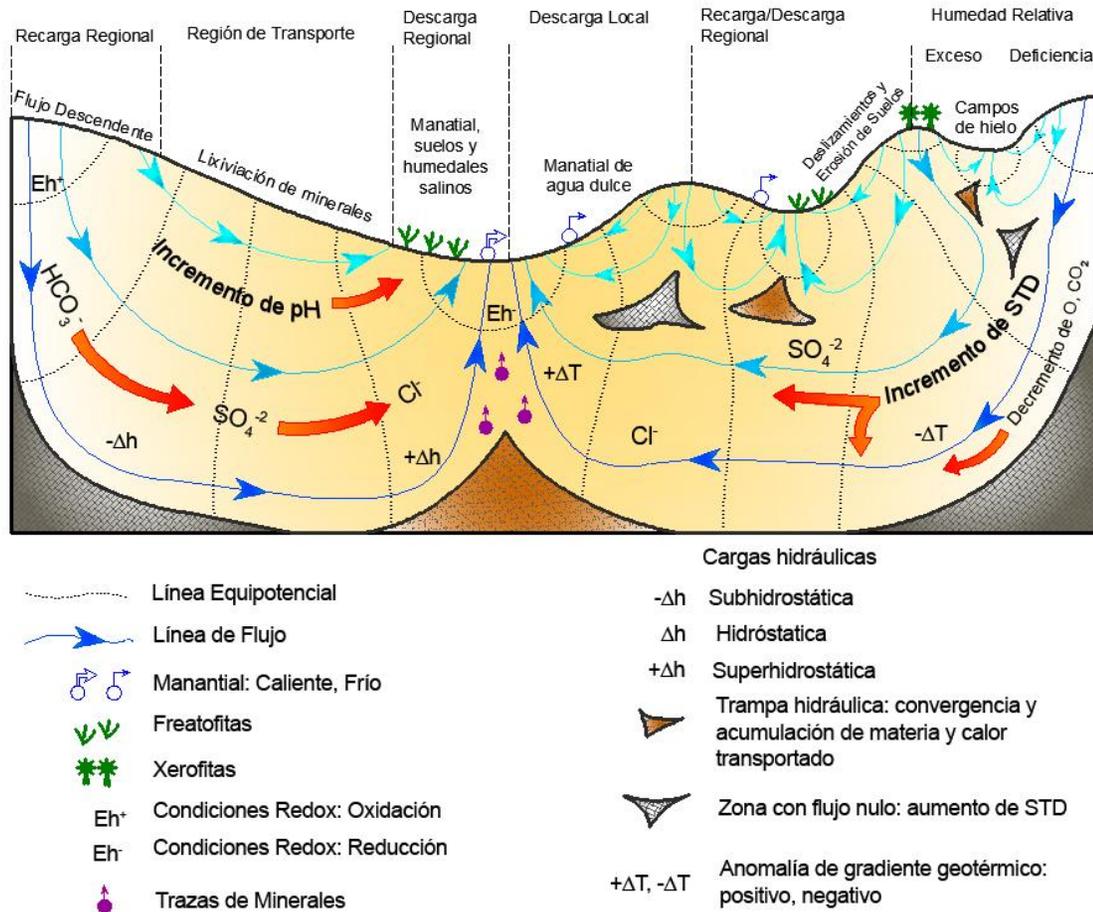
## 5.4 RÉGIMEN HIDROGEOLÓGICO

### 5.4.1 Sistemas de Flujo de Agua Subterránea

La Figura 5.3 muestra un esquema teórico simplificado, que idealiza el sistema de flujo para la situación con topografía irregular (derecha del gráfico) y el sistema de flujo simple (izquierda del gráfico), también describe los procesos de evolución hidrogeológica con flujo local, intermedio y regional.

De manera general todos los sistemas de flujo tienen las siguientes partes: zona de recarga, zona de transición y zona de descarga. Las áreas de recarga están caracterizadas por tener líneas equipotenciales casi horizontales, lo cual indica que el flujo será casi vertical descendente, en tanto que en las zonas de descarga se tiene un flujo vertical ascendente debido a bajas cargas hidráulicas. La zona de transición está caracterizada por tener líneas equipotenciales casi verticales, lo que significa que el flujo debe ser preferentemente horizontal.

El sistema de flujo local es el más simple donde las áreas de recarga y descarga están cerca o son colindantes. El flujo intermedio se caracteriza por tener una zona de transición y altos topográficos entre la zona de recarga y descarga. Finalmente, el flujo regional tiene las zonas de recarga en las cotas más altas de la cuenca (parteaguas) y las cotas más bajas son los lugares de descarga del sistema (Tóth, 1963). Las principales interacciones entre el AS y el medio ambiente son: interacción química, interacción física e interacción cinética, los procesos más relevantes de estas interacciones son mostradas en la Figura 5.3 y detalladas a continuación.



**Figura 5.3** Sistemas de Flujo (local, intermedio y regional) presentes en la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo. Indicando fenómenos naturales producidos en los medios de flujo subterráneo (modificado de Tóth, 1999)

- Cargas hidráulicas sub-normal y súper-hidrostática dependen de la dirección del flujo desde las áreas de recarga a las áreas de descarga, respectivamente.
- Condiciones de relativa sequía en aguas superficiales y bajos contenidos de humedad en suelos en las áreas de recarga (balance hidrológico negativo) y en las áreas de descarga excedentes de agua (balance hidrológico positivo) originando la formación de humedales.
- Cambios sistemáticos en las facies de aniones del agua de  $\text{HCO}_3^-$  pasando por  $\text{SO}_4^{-2}$ , a  $\text{Cl}^-$ , debidos a la profundidad y al sistema de flujo.
- Lixiviación química de los suelos y rocas superficiales cerca a las áreas de recarga.
- En las áreas de descarga el incremento en los contenidos de sal en suelos (se puede presentar la depositación de sales de valor comercial).
- Anomalías negativas y positivas del gradiente y del calor geotérmico en las áreas de descenso y ascenso del flujo, respectivamente.

- g. Condiciones químicas de oxidación en áreas superficiales de recarga y reducción química en las zonas de descarga.
- h. Respuesta identificable del tipo de la cubierta vegetal debido a las condiciones de los nutrientes y contrastes, generadas por el ingreso y salida de agua en el sistema (presencia de xerofitas y freatofitas).
- i. Mayor vulnerabilidad a deslizamiento de suelo y de rocas, debido al incremento en la presión de poro y al papel del agua como agente lubricante en los planos de falla.
- j. Acumulación de minerales transportados como iones metálicos (uranio, sulfuros), hidrocarburos y contaminantes antropogénicos, en zonas donde converge el flujo.

Los grupos básicos en los que se dividen las manifestaciones del flujo subterráneo son: a) hidrología e hidráulica, b) química y mineralogía, c) vegetación, d) mecánica del suelo y de las rocas e) geomorfología y f) transporte (Tóth, 1984; Tóth, 1999)

Cada cuenca hidrológica tiene características del flujo subterráneo únicas, donde sus manifestaciones son particulares y de distinta magnitud. Los métodos que permiten caracterizar los sistemas de flujo que se pueden usar son: análisis de registros históricos, análisis isotópico, hidrogeoquímica, observaciones de campo y técnicas de percepción remota (Bobba *et al.*, 1992; Clark y Fritz, 1997; Durazo y Farvolden, 1989; Navarro-De León, 2005; Salama *et al.*, 1994).

#### 5.4.2 Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico

La presencia de manantiales permite evidenciar los sistemas de flujo y clasificarlos dependiendo de sus propiedades físicas. La temperatura es un buen indicador de la interacción agua-roca, según la clasificación propuesta por Schoeller (1962) las aguas termales se clasifican según los valores mostrados en la tabla 5.3 (Custodio y Llamas, 1996).

**Tabla 5.3** Clasificación de aguas minerales y termales según Schoeller (1962).

Aguas termales	$t > t_m + 4^{\circ}\text{C}$
Aguas normales	$t_m \leq t \leq t_m + 4^{\circ}\text{C}$
Aguas frías	$t < t_m$

Siendo  $t$  la temperatura del agua y  $t_m$  la temperatura media anual del sitio.

Otra clasificación propuesta es la de Bogomolov (1966). Donde se tienen las siguientes categorías expresadas en la Tabla 5.4 (Custodio y Llamas, 1996).

**Tabla 5.4** Clasificación de aguas minerales y termales según Bogomolov (1966).

Muy frías	$t < 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Frías	$5 < t \leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Moderadamente frías	$10 < t \leq 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tibias	$18 < t \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Moderadamente tibias	$25 < t \leq 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Calientes	$37 < t \leq 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Muy calientes	$t > 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Werner (1996) clasificó el AS por su temperatura en dos grupos: a) Aguas frías, son las aguas de los sistemas de flujo somero y que son afectadas casi exclusivamente por el factor climático; y b) Aguas termales, que son las que pertenecen a los sistemas profundos y de zonas de actividad volcánica reciente, son afectadas casi exclusivamente por el factor geotérmico.

Otro factor que afecta la temperatura del AS es la altura topográfica, este efecto puede ser evidenciado en la Tabla 5.5 la cual presenta una clasificación de los manantiales en la región del Municipio de Linares (Werner, 1996).

En conclusión, los manantiales ubicados entre la SMO, la Ciudad de Linares y la PCP, tienen en común la característica de ser de agua fría, hecho que nos indica que los sistemas a los que pertenecen son locales e intermedios, las diferencias se deben a su posición geográfica y la altura a la que se encuentran ubicados.

Al interior de la CHRP, se detectaron 7 manantiales (Figura 5.4), que se ubican en la SMO y en el frente de la SMO (INEGI, 1983b). Estos manantiales corresponden a dos sistemas de flujo:

- Zona A:* En las cercanías al parteaguas de la cuenca y con manantiales de agua fría, sus caudales varían dependiendo de la época el año, identifican zonas con sistemas de flujo local.
- Zona B:* Se encuentran en el frente de la SMO, los cuales pueden indicar un aporte permanente de AS procedente de un sistema de flujo intermedio.

**Tabla 5.5** Clasificación del aguas de manantial para la región de Linares (Werner, 1996).

<b><u>Manantiales de agua fría</u></b>	<b>T (°C) – Fecha</b>	<b>Altura (m.s.n.m)</b>
Ojo de Agua La Escondida	24.0 – (06/1991)	290
Ojo de Agua Las Crucitas	22.5 – (05/1991)	500
Ojo de Agua Abajo, Cañón Potosí*	20.8 – (12/1993)	750
Ojo de Agua Guadalupe, Cañón Potosí*	20.3 – (12/1993)	850
Los Chiqueros, Cañón Santa Rosa	19.0 – (04/1991)	850
El Puerto, Cañón Santa Rosa	18.0 – (04/1991)	1160
Ojo de Agua Abajo, Iturbide	20.5 – (06/1991)	1200
Manantial Puente de Dios*	20.6 – (09/1994)	1600
Manantial Dieciocho de Marzo*	13.9 – (09/1994)	2170
<i>Temperatura media anual ambiente, Linares (60 años)</i>		
	22.3	350
<i>Temperatura media anual ambiente, Iturbide</i>		
	17.5	1200
<b><u>Manantiales de aguas termales</u></b>		
Baño San Ignacio (Campo Curricán)*	37.0	245
Laguna El Avileño*	30.0	255
Los Pocitos (Pozo artesiano)*	31.0	242
Baño Azufrado de la Cruz, Cañón Potosí*	26.4	1250

\*Fuera de la Cuenca del Río Pablillo (CHRP)

El movimiento del AS en la CHRP es un sistema de flujo por gravedad. La recarga principalmente tiene lugar en las zonas montañosas cercanas al parteaguas y en el frente de la SMO. El AS fluye hasta su descarga desde diversas regiones dependiendo principalmente de su posición geológica y topográfica. Dicho comportamiento corresponde a un flujo regional somero que es el sistema preponderante en el área de estudio. La investigación se centró en los acuíferos someros por ser los que se explotan y explotaron en las últimas décadas.

El modelo conceptual propuesto para el área de estudio, es importante para el manejo y protección del agua contenida en el subsuelo. Cada sistema de flujo es una entidad dinámica que opera en una escala espacio-temporal, con un orden y distribución que corresponde con el dominio de la escala. Los sistemas de flujo local son los más dinámicos, porque alcanzan velocidades más altas y con trayectorias a través del medio geológico más cortas. Estos sistemas reaccionan más rápidamente a los cambios inducidos por la recarga o extracción, mientras que los sistemas intermedios reaccionan de manera más lenta a los procesos de ingreso y salida hídrica (Navarro-De León, 2005; Tóth, 2000).

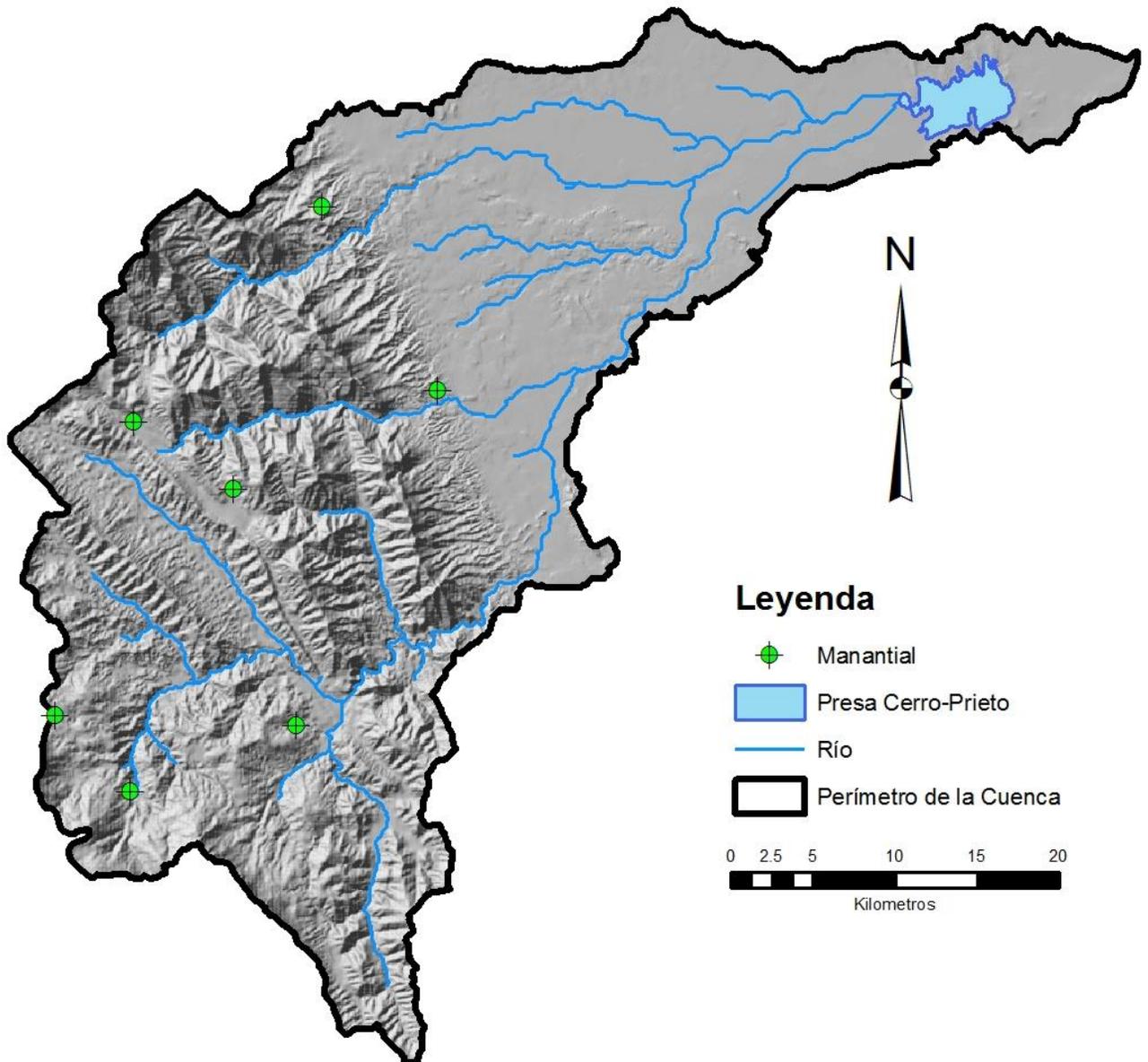


Figura 5.4 Ubicación de Manantiales en la CHR.

## 5.5 RECARGA

El origen del agua de recarga está determinada por la precipitación sobre la cuenca, la distribución y el volumen de recarga ha sido estimada utilizando el método de Thiessen y las aproximaciones de Turc (1954), (Lerner *et al.*, 1990).

La recarga se distribuye siguiendo los patrones climáticos y la intensidad de la precipitación de la región. Las áreas de recarga de la cuenca se muestran en la Figura 6.2.

## 5.6 COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO

La configuración de la piezometría se muestra en las Figuras 5.5 y 5.6 donde se observa que el patrón dominante del flujo subterráneo sigue una dirección SW-NE, el cual varía mínimamente a lo largo del tiempo presentando zonas de explotación concentrada en áreas puntuales.

En el mapa piezométrico para el año 1981, presenta las cargas hidráulicas en los bordes del área de estudio que alcanzan ~20 m de profundidad y que van disminuyendo en dirección este, donde las líneas equipotenciales con menor valor son iguales a ~5 m de profundidad. Estos niveles freáticos más superficiales se encuentran heterogéneamente distribuidos en la parte central y cerca del borde oeste de la Presa Cerro-Prieto. Se destacan tres zonas de extracción de AS importantes, presumiblemente se deben a zonas donde se inició una explotación substancial, dichas áreas pudieron ser las primeras zonas de abastecimiento de AS para fines agrícolas, las mismas se ubican en el sector oeste, norte y central del área de estudio.

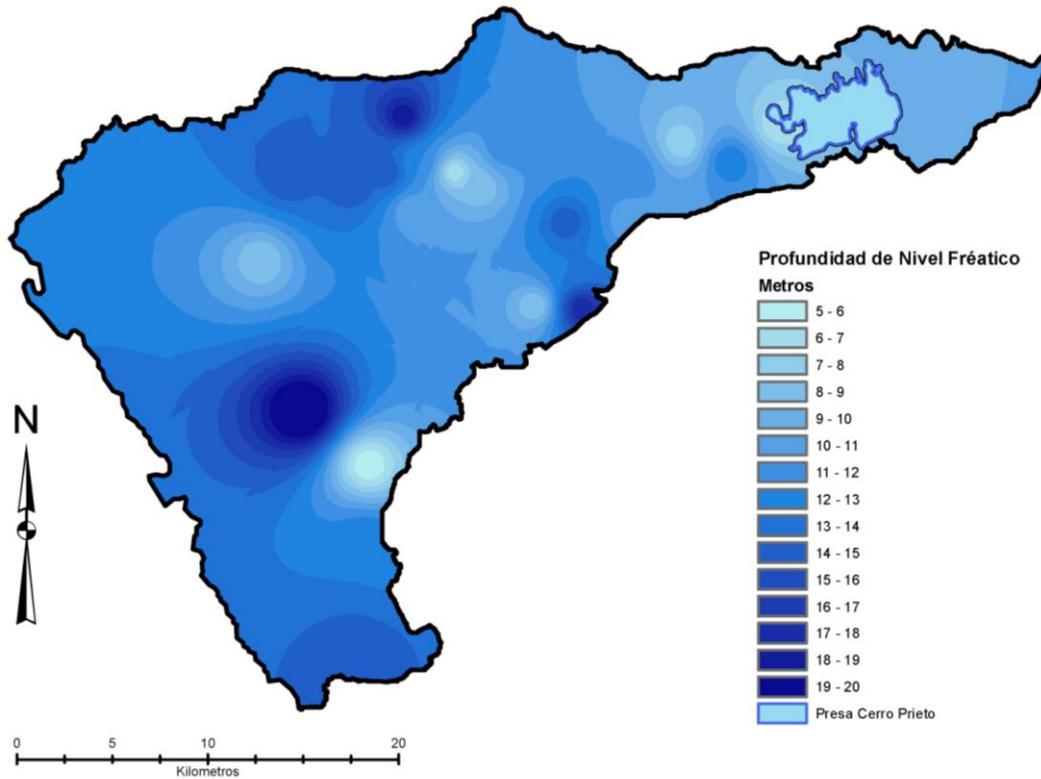


Figura 5.5 Carta piezométrica (Noviembre-1981)

La distribución de la piezometría para el año 2009 varió considerablemente a la situación inicial de análisis (1981) donde en la zona de recarga en el sector noroeste las cargas hidráulicas alcanzan una profundidad ~2.75 m (nivel freático somero) y van aumentando su profundidad en

dirección este, donde las líneas equipotenciales con mayor profundidad igual a 20 m, coinciden con el área donde se encuentra localizada la ciudad de Linares y cerca del borde este de la Presa Cerro Prieto. A lo largo de 28 años, se demuestra de manera evidente el cambio en el régimen del flujo subterráneo, concluyéndose que los niveles freáticos pueden tener relación directa con los aprovechamientos y extracciones realizadas por las poblaciones humanas. Un total de 41 mapas piezométricos fueron generados sobre la base de las piezometrías medidas en campo (Tabla 5.6).

Tabla 5.6 Mapas Piezométricos generados entre 1981-2009

Año	Número de mapas generados en el SIG								Total
	Ene-Abr	Tipo	May-Jul	Tipo	Ago-Oct	Tipo	Nov-Dic	Tipo	
2009	1	E							1
2008	1	E	1	E					2
2007	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2006	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2005	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2004	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2003	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2002	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2001	1	D	1	D	1	D	1	D	4
2000	1	D	1	D	1	D	1	D	4
1998	1	D	1	D	1	D	1	D	4
1994	1	E							1
1981							1	E	1
<b>Gran total</b>									<b>41</b>

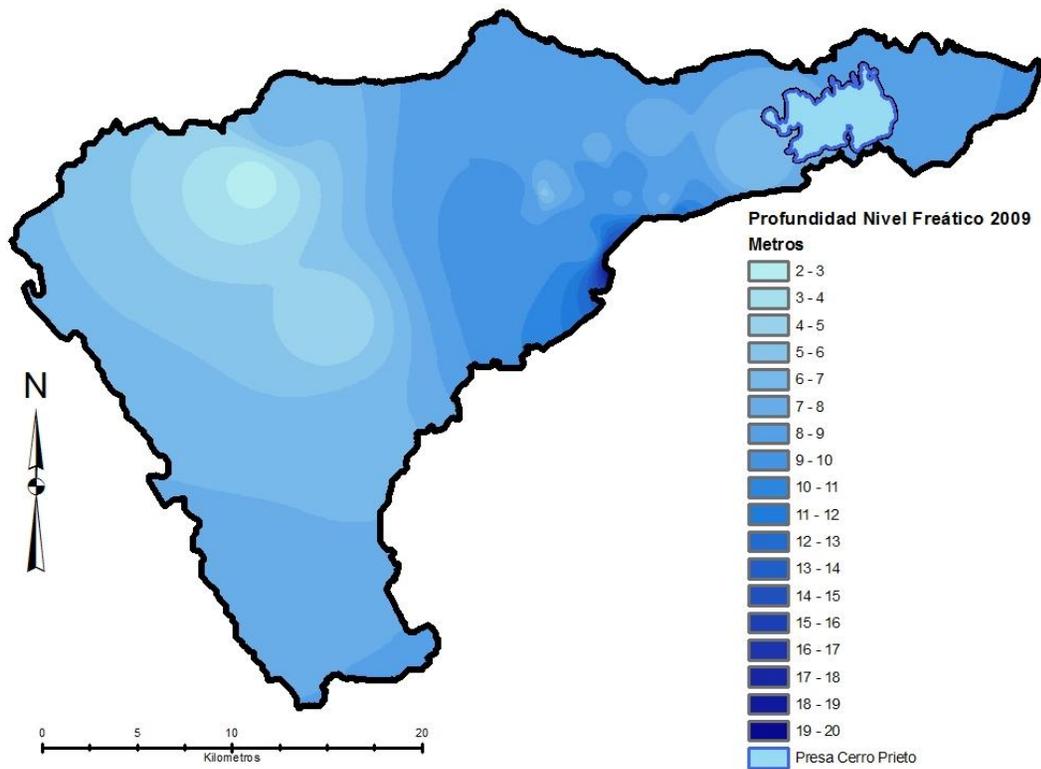


Figura 5.6 Carta piezométrica (Marzo - 2009)

## 5.7 MUESTREO Y ANÁLISIS EN LABORATORIO HIDROGEOQUÍMICO

El levantamiento de datos de campo fue realizado en diferentes campañas, en diferentes estudios y por diferentes personas. Las muestras más antiguas fueron levantadas por el INEGI, (1981), dichos datos sirvieron para la publicación de la carta de hidrología subterránea (INEGI, 1983a). Esta base de datos fue ampliada con los resultados de 34 mediciones realizadas por Galván-Mancilla (1996) en el año 1994.

En el periodo comprendido entre 2000 y 2002 se realizaron campañas de levantamiento de datos, midiéndose 30 pozos en el año 2000, 21 pozos durante el año 2001, durante el 2002 se recopilaron 19 muestras y finalmente, en el año 2007 se registraron 30 pozos. Todos estos datos provienen de pozos destinados al suministro de agua potable para la población de Linares y sus alrededores.

Los datos más recientes del área de estudio fueron levantados en dos campañas de campo realizadas en abril de 2008 y marzo de 2009, donde se registraron 23 muestras en los mismos puntos. Las muestras correspondientes al año 2008 fueron analizadas en los laboratorios Actlab's (Canada), Indequim ALS (Monterrey) y el laboratorio de geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Tierra (Linares).

Las muestras correspondientes al año 2009 fueron analizadas en el laboratorio de hidrogeoquímica del Institut für Angewandte Geowissenschaften en la Technische Universität Darmstadt (Alemania). Las Figuras 5.7 y 5.8 son ejemplos de puntos de muestreo de las últimas campañas de campo.



**Figura 5.7** Toma de muestras marzo 2008 (Vivienda ubicada en la zona industrial de Linares)



**Figura 5.8** Medición de parámetros in situ (Ingreso a colonia Camachito)

La medición de la conductividad y pH se realizó utilizando un equipo portátil con electrodo de medición comercial de la marca Wissenschaftlich-Technische Werkstätten (WTW) modelo MultiLine F/SET-3 (fabricación alemana) previamente calibrado en laboratorio con una solución amortiguadora de KCl para la conductividad y una solución buffer para calibrar el pH a 7.

La medición de Eh (potencial oxido-reducción), se realizó con un electrodo de la marca WWT-F/SET-3 calibrado previamente en laboratorio. Con el uso del mismo equipo portátil se tomaron medidas de la temperatura de las muestras de AS inmediatamente después de su extracción, dicho procedimiento pretende optimizar el registro de datos físicos en campo.

Las muestras de AS fueron colectadas en frascos de polietileno de alta densidad, las cuales se refrigeraron a una temperatura de 4 a 5°C en contenedores provisionales para permitir su traslado a los diferentes laboratorios responsables de los análisis fisicoquímicos para las campañas de los años 2008 y 2009. Los valores correspondientes a las muestras de los años 1981 y 1994, fueron obtenidas de los reportes generados por los responsables de dichas campañas (Galván-Mancilla, 1996; INEGI, 1983a).

La Tabla 5.7 presenta a modo de ejemplo los datos de los parámetros físicos de las muestras consideradas en el presente trabajo, su ubicación geo-referenciada se muestra en las Figuras 5.11 a 5.21.

**Tabla 5.7** Parámetros fisicoquímicos de campo de muestras de agua colectadas en el área de estudio en los años 1981, 2000, 2001, 2001, 2002, 2007, 2008 y 2009. Se omite la localización de los puntos de muestreo por confidencialidad.

<i>MUESTRA</i>	<i>FECHA</i>	<i>pH</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Cond. Elec. µS/cm</i>	<i>MUESTRA</i>	<i>FECHA</i>	<i>pH</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Cond. Elec. µS/cm</i>
<i>IN-01_81</i>	12/11/1981	7.90	21.00	560.00	<i>DW-01_00</i>	02/01/2000	7.21	24.00	876.00
<i>IN-02_81</i>	12/11/1981	8.30	18.00	700.00	<i>DW-02_00</i>	02/01/2000	7.39	25.00	536.00
<i>IN-03_81</i>	12/11/1981	8.10	21.00	590.00	<i>DW-03_00</i>	02/02/2000	7.19	24.00	769.00
<i>IN-04_81</i>	12/11/1981	7.70	21.00	380.00	<i>DW-04_00</i>	02/01/2000	7.29	27.00	915.00
<i>IN-05_81</i>	24/11/1981	8.00	21.00	1240.00	<i>DW-05_00</i>	02/02/2000	7.52	25.00	932.00
<i>IN-06_81</i>	23/11/1981	8.10	23.00	720.00	<i>DW-06_00</i>	02/02/2000	7.55	25.00	734.00
<i>IN-07_81</i>	23/11/1981	8.10	23.00	810.00	<i>DW-07_00</i>	02/03/2000	7.58	23.00	733.00
<i>IN-08_81</i>	13/11/1981	7.60	24.00	550.00	<i>DW-08_00</i>	02/02/2000	7.36	25.00	1108.00
<i>IN-09_81</i>	23/11/1981	8.10	22.00	670.00	<i>DW-09_00</i>	02/02/2000	7.69	25.00	1024.00
<i>IN-10_81</i>	23/11/1981	8.10	23.00	870.00	<i>DW-10_00</i>	02/07/2000	7.79	26.00	733.00
<i>IN-11_81</i>	22/11/1981	8.10	24.00	560.00	<i>DW-11_00</i>	02/08/2000	7.43	26.00	847.00
<i>IN-12_81</i>	22/11/1981	7.70	22.00	920.00	<i>DW-12_00</i>	02/04/2000	7.86	23.00	799.00
<i>IN-13_81</i>	22/11/1981	7.60	23.00	1210.00	<i>DW-13_00</i>	02/04/2000	7.37	25.00	1249.00
<i>IN-14_81</i>	13/11/1981	8.00		580.00	<i>DW-14_00</i>	02/07/2000	7.87	19.00	647.00
<i>IN-15_81</i>	13/11/1981	7.60	20.00	620.00	<i>DW-15_00</i>	02/04/2000	7.74	25.00	755.00
<i>IN-16_81</i>	22/11/1981	7.90	24.00	660.00	<i>DW-16_00</i>	02/04/2000	7.52	25.00	627.00
<i>IN-17_81</i>	22/11/1981	7.60	24.00	560.00	<i>DW-17_00</i>	02/03/2000	7.96	25.00	843.00
<i>IN-18_81</i>	23/11/1981	7.60	21.00	4900.00	<i>DW-18_00</i>	01/02/2000	7.36	25.00	1197.00
<i>IN-19_81</i>	22/11/1981	7.90	23.00	720.00	<i>DW-19_00</i>	01/02/2000	7.24	25.00	1178.00
<i>IN-20_81</i>	22/11/1981	7.40	26.00	1220.00	<i>DW-20_00</i>	21/05/2007	7.47	25.00	8320.00
<i>IN-21_81</i>	22/11/1981	7.80		460.00	<i>DW-21_00</i>	02/04/2000	7.56	26.00	989.00
<i>IN-22_81</i>	23/11/1981	7.80	25.00	1510.00	<i>DW-22_00</i>	02/02/2000	7.60	16.00	1138.00
<i>IN-23_81</i>	23/11/1981	8.10	24.00	830.00	<i>DW-23_00</i>	02/07/2000	7.33	28.00	1424.00
<i>IN-24_81</i>	13/11/1981	7.60	21.00	670.00	<i>DW-24_00</i>	02/02/2000	7.86	25.00	706.00
<i>IN-25_81</i>	22/11/1981	7.50		810.00	<i>DW-25_00</i>	02/08/2000	7.55	25.00	816.00
					<i>DW-26_00</i>	02/01/2000	7.53	24.00	1191.00
					<i>DW-27_00</i>	02/02/2000	7.58	25.00	737.00
					<i>DW-28_00</i>	02/04/2000	7.28	26.00	1834.00
					<i>DW-29_00</i>	02/07/2000	7.81	27.00	1103.00
					<i>DW-30_00</i>	02/03/2000	7.73	26.00	981.00
<i>MUESTRA</i>	<i>FECHA</i>	<i>pH</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Cond. Elec. µS/cm</i>	<i>MUESTRA</i>	<i>FECHA</i>	<i>pH</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Cond. Elec. µS/cm</i>
<i>DW-01_01</i>	25/01/2001	7.90	27.00	1116.00	<i>DW-01_02</i>	16/08/2002	7.60	-	1106.00
<i>DW-02_01</i>	30/01/2001	7.30	23.00	1163.00	<i>DW-02_02</i>	08/08/2002	7.63	-	1051.00
<i>DW-03_01</i>	30/01/2001	7.20	25.00	1100.00	<i>DW-03_02</i>	08/08/2002	7.79	-	909.00
<i>DW-04_01</i>	30/01/2001	7.50	20.00	794.00	<i>DW-04_02</i>	15/08/2002	7.50	-	1247.00
<i>DW-05_01</i>	30/01/2001	7.80	22.00	1412.00	<i>DW-05_02</i>	08/08/2002	7.84	-	894.00
<i>DW-06_01</i>	30/01/2001	7.90	23.00	1375.00	<i>DW-06_02</i>	15/08/2002	7.55	-	1389.00
<i>DW-07_01</i>	30/01/2001	7.60	20.00	724.00	<i>DW-07_02</i>	15/08/2002	7.73	-	787.00
<i>DW-08_01</i>	30/01/2001	7.70	23.00	840.00	<i>DW-08_02</i>	08/08/2002	8.00	-	1361.00
<i>DW-09_01</i>	30/01/2001	8.10	19.00	671.00	<i>DW-09_02</i>	08/08/2002	7.44	-	1343.00
<i>DW-10_01</i>	30/01/2001	7.60	22.00	1192.00	<i>DW-10_02</i>	08/08/2002	7.59	-	1293.00
<i>DW-11_01</i>	30/01/2001	7.10	24.00	1418.00	<i>DW-11_02</i>	08/08/2002	7.90	-	863.00
<i>DW-12_01</i>	30/01/2001	7.20	24.00	1403.00	<i>DW-12_02</i>	08/08/2002	7.60	-	1346.00
<i>DW-13_01</i>	30/01/2001	7.30	20.00	986.00	<i>DW-13_02</i>	08/08/2002	7.84	-	885.00
<i>DW-14_01</i>	30/01/2001	7.90	22.00	1338.00	<i>DW-14_02</i>	16/08/2002	7.89	-	542.00
<i>DW-15_01</i>	30/01/2001	7.50	22.00	787.00	<i>DW-15_02</i>	08/08/2002	7.83	-	952.00
<i>DW-16_01</i>	30/01/2001	7.10	23.00	1432.00	<i>DW-16_02</i>	08/08/2002	7.65	-	1360.00
<i>DW-17_01</i>	30/01/2001	7.70	22.00	822.00	<i>DW-17_02</i>	15/08/2002	7.77	-	1077.00
<i>DW-18_01</i>	30/01/2001	7.90	19.00	1975.00					
<i>DW-19_01</i>	30/01/2001	7.70	23.00	887.00					
<i>DW-20_01</i>	30/01/2001	7.80	27.00	964.00					
<i>DW-21_01</i>	30/01/2001	7.80	23.00	965.00					

Continuación Tabla 5.7

MUESTRA	FECHA	pH	Temp. °C	Cond. Elec. $\mu\text{S/cm}$	MUESTRA	FECHA	pH	Temp. °C	Cond. Elec. $\mu\text{S/cm}$	Eh mV
DW-01_07	28/05/2007	7.19	26.00	1080.00	RD-01_08	09/04/2008	7.06	25.50	1448.00	252.00
DW-02_07	02/05/2007	7.33	25.00	990.00	RD-02_08	09/04/2008	7.33	24.60	1424.00	-333.00
DW-03_07	02/05/2007	7.22	25.00	1010.00	RD-03_08	09/04/2008	6.93	24.80	924.00	241.00
DW-04_07	28/05/2007	7.29	26.00	980.00	RD-04_08	09/04/2008	6.63	26.40	1972.00	220.00
DW-05_07	02/05/2007	7.33	25.00	942.00	RD-05_08	09/04/2008	6.76	25.20	1577.00	245.00
DW-06_07	21/05/2007	7.40	25.00	884.00	RD-06_08	08/04/2008	7.64	26.40	4250.00	183.00
DW-07_07	24/05/2007	7.77	25.00	730.00	RD-07_08	08/04/2008	7.05	25.30	868.00	206.00
DW-08_07	28/05/2007	7.33	25.00	930.00	RD-08_08	08/04/2008	7.41	21.30	514.00	275.00
DW-09_07	21/05/2007	7.12	25.00	1220.00	RD-09_08	08/04/2008	7.09	26.10	833.00	284.00
DW-10_07	24/05/2007	7.89	25.00	826.00	RD-10_08	08/04/2008	7.29	25.40	735.00	285.00
DW-11_07	21/05/2007	7.19	25.00	871.00	RD-11_08	08/04/2008	7.72	22.70	493.00	276.00
DW-12_07	28/05/2007	7.34	26.00	963.00	RD-12_08	08/04/2008	6.90	26.40	1093.00	214.00
DW-13_07	28/05/2007	7.01	25.00	1270.00	RD-13_08	09/04/2008	7.14	23.80	829.00	215.00
DW-14_07	28/05/2007	7.10	25.00	1270.00	RD-14_08	08/04/2008	7.32	21.50	454.00	275.00
DW-15_07	02/05/2007	7.14	25.00	1200.00	RD-15_08	08/04/2008	7.08	25.00	617.00	280.00
DW-16_07	28/05/2007	7.16	25.00	1160.00	RD-16_08	10/04/2008	6.76	24.60	1176.00	220.00
DW-17_07	24/05/2007	7.31	25.00	2340.00	RD-17_08	09/04/2008	6.92	26.50	1300.00	213.00
DW-18_07	28/05/2007	7.40	25.00	762.00	RD-18_08	09/04/2008	7.10	29.70	1070.00	243.00
DW-19_07	21/05/2007	7.72	24.00	524.00	RD-19_08	08/04/2008	6.93	29.00	1110.00	359.00
DW-20_07	02/05/2007	7.42	25.00	936.00	RD-20_08	09/04/2008	6.74	25.00	1124.00	163.00
DW-21_07	02/05/2007	7.22	25.00	1130.00	RD-21_08	09/04/2008	6.98	26.50	794.00	226.00
DW-22_07	02/05/2007	7.17	25.00	1340.00	RD-22_08	09/04/2008	7.04	26.00	761.00	233.00
DW-23_07	02/02/2000	7.78	25.00	761.00	RD-23_08	09/04/2008	7.03	24.10	1140.00	255.00
DW-24_07	24/05/2007	7.57	25.00	980.00						
DW-25_07	02/05/2007	7.22	24.00	1150.00						
DW-26_07	24/05/2007	7.41	25.00	1440.00						
DW-27_07	28/05/2007	7.21	25.00	9620.00						
DW-28_07	24/05/2007	7.58	25.00	8850.00						

MUESTRA	FECHA	pH	Temp. °C	Cond. Elec. $\mu\text{S/cm}$	Eh mV
RD-01_09	17/03/2009	7.48	21.70	1603.00	227.00
RD-02_09	18/03/2009	8.12	22.50	1105.00	234.00
RD-03_09	17/03/2009	7.02	23.50	968.00	288.00
RD-04_09	17/03/2009	6.67	22.80	2790.00	222.00
RD-05_09	17/03/2009	6.82	22.90	1954.00	247.00
RD-06_09	17/03/2009	6.76	21.90	8240.00	278.00
RD-07_09	17/03/2009	6.91	23.70	1002.00	253.00
RD-08_09	17/03/2009	7.46	19.70	482.00	307.00
RD-09_09	18/03/2009	7.27	25.30	1188.00	220.00
RD-10_09	18/03/2009	7.30	20.10	763.00	231.00
RD-11_09	17/03/2009	7.94	21.50	542.00	311.00
RD-12_09	17/03/2009	7.74	21.60	1163.00	263.00
RD-13_09	17/03/2009	7.50	22.40	932.00	273.00
RD-14_09	17/03/2009	7.48	20.30	474.00	312.00
RD-15_09	17/03/2009	6.93	23.30	658.00	314.00
RD-16_09	18/03/2009	6.68	25.30	1194.00	222.00
RD-17_09	17/03/2009	6.78	23.00	1540.00	247.00
RD-18_09	18/03/2009	7.03	25.10	1052.00	215.00
RD-19_09	18/03/2009	6.61	25.30	1256.00	254.00
RD-20_09	18/03/2009	6.71	20.60	1150.00	148.00
RD-21_09	18/03/2009	6.98	25.40	836.00	231.00
RD-22_09	18/03/2009	7.00	24.20	859.00	227.00
RD-23_09	18/03/2009	6.85	25.80	964.00	255.00

### 5.7.1 Métodos analíticos hidrogeoquímicos

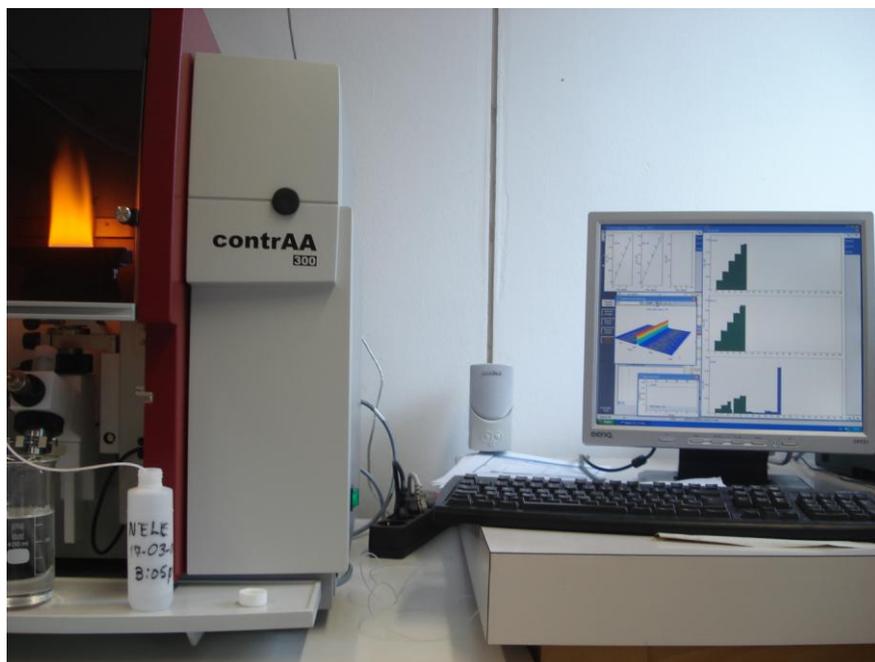
Las muestras colectadas en el 2008 fueron transportadas al Laboratorio de Geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Tierra (FCT) para la determinación de iones mayores. Las muestras destinadas a la determinación de iones minoritarios (metales pesados) fueron enviadas al Activation Laboratories (Actlabs) y las muestras para análisis de coliformes fecales y coliformes totales se enviaron al Laboratorio de Análisis Industriales Linares.

Las muestras recolectadas el año 2009, fueron enviadas al laboratorio de hidrogeoquímica del Institut für Angewandte Geowissenschaften en Darmstadt (Alemania), donde la determinación de cationes fue medida por el método de espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción (ICP-MS, Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry; (Jarvis *et al.*, 1991)). Esta metodología se basa en la ionización de la muestra en un estado de plasma; el transporte y la separación de las especies catiónicas se realiza de acuerdo a su relación carga-masa en un sistema de deflexión magnética. Los instrumentos del ICP-MS emplean el plasma de argón como fuente ionizada y un receptor de masa espectrométrica para detectar los iones producidos. Durante el análisis, las soluciones de las muestras son transportadas en forma de gas argón hacia el ICP. El gas es atomizado e ionizado formando plasma. Los iones positivos en el plasma son enfocados después hacia el receptor espectrométrico donde son separados de acuerdo a su masa detectada. Estas metodologías fueron utilizadas eficientemente en el trabajo de Garza-Tamez (2009). Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran los equipos utilizados para el análisis de las muestras en el laboratorio de la TU-Darmstadt.



Figura 5.9 Equipo ICP-OS laboratorio de hidroquímica TU-Darmstadt

Las muestras que excedieron los límites máximos de detección fueron analizadas por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OS, Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry (Thompson y Walsh, 1989). Esta técnica analítica es versátil, rápida y precisa, provee alta calidad en análisis isotópicos y multi-elementos y es útil para muestras en solución. La técnica es capaz de determinar las concentraciones de más de 70 elementos en un solo análisis.



**Figura 5.10** Equipo de Absorción Atómica. Laboratorio de Hidroquímica de la TU-Darmstadt.

La determinación de aniones se realizó por el método de Cromatografía de Iones (IC, Ion Chromatography; (Pohl y Jhonsdon, 1980)) dentro de una columna metálica empacada con una resina de intercambio iónico, en donde, las muestras de agua son analizadas para determinar y cuantificar un grupo de 7 aniones. Este análisis fue aplicable a concentraciones <50 mg/l para F; <75 mg/l para Cl, NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub>; 125 mg/l para PO<sub>4</sub>, <250 mg/L para el Br y 375 mg/l para el SO<sub>4</sub>. Las muestras que excedieron este intervalo fueron diluidas para evitar la sobresaturación al momento del siguiente análisis.

### 5.7.2 Base de datos hidrogeoquímicos

La información de campo y analítica fue compilada en una base de datos ingresados a los programas Aquachem (Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, Canadá) y planillas en Microsoft-EXCEL. Con esta información se realizó el balance de iones y la preparación de diversos diagramas

hidroquímicos. La información fisicoquímica fue incorporada a un SIG, con el fin de centralizar, analizar y visualizar la variación espacial de los parámetros. Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran la distribución de la Temperatura (°C) y Conductividad Eléctrica (µS/cm) respectivamente, para las muestras del año 2009. Las Tablas 5.8 – 5.10 presentan la información sobre composición hidrogeoquímica de las muestras. Todos los resultados de los análisis fueron transformados a miliequivalentes/litro (meq/litro) con el objetivo de evaluar el Balance Iónico (BI) de cada solución por medio de la siguiente ecuación:

$$BI = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} * 100 \quad (5.1)$$

Una vez comprobado el balance iónico de las muestras, la información se utilizó para preparar diversos gráficos, que incluyen diagramas de Piper, Schoeller-Berkaloff y bivariados (Hem, 1989).

**Tabla 5.8** Iones Mayores y balance iónico de muestras de 1981 (INEGI, 1983a)

MUESTRA	UNIDAD	IN-01_81	IN-02_81	IN-03_81	IN-04_81	IN-05_81	IN-06_81	IN-07_81	IN-08_81	IN-09_81
<b>IONES MAYORES</b>										
Na+	mg/l	16.80	17.00	30.40	18.20	62.30	19.50	20.00	19.50	20.90
K +	mg/l	0.40	0.40	1.20	0.00	6.60	0.40	0.40	0.00	0.40
Ca++	mg/l	86.00	93.00	72.00	37.00	114.00	102.00	102.00	76.00	100.00
Mg++	mg/l	10.10	15.80	16.60	20.00	55.40	13.70	16.40	12.50	14.90
Cl-	mg/l	3.50	17.80	10.60	3.50	198.80	35.50	28.40	14.20	28.40
SO4--	mg/l	166.60	206.40	83.00	62.40	350.10	177.10	187.70	41.30	187.70
HCO3-	mg/l	122.00	140.30	256.00	176.90	146.40	146.40	146.40	262.30	146.40
<b>RESULTADOS</b>										
Σ Aniones	meq/l	5.61	7.12	6.42	4.30	15.38	7.09	7.15	5.60	7.15
Σ Cationes	meq/l	5.86	6.69	6.31	4.28	13.13	7.08	7.32	5.67	7.14
Balance Iónico		2.23%	-3.10%	-0.88%	-0.17%	-7.90%	-0.09%	1.18%	0.61%	-0.10%

Continuación Tabla 5.8

MUESTRA	UNIDAD	IN-10_81	IN-11_81	IN-12_81	IN_13_81	IN-14_81	IN-15_81	IN-16_81	IN-17_81	IN-18_81
<b>IONES MAYORES</b>										
Na+	mg/l	23.50	29.00	58.40	49.00	23.90	23.90	59.80	41.40	386.90
K +	mg/l	0.40	0.40	0.40	0.40	4.30	0.80	0.40	0.40	0.80
Ca++	mg/l	136.00	78.00	101.00	117.00	40.00	70.00	62.00	48.00	420.00
Mg++	mg/l	20.60	18.50	31.70	27.50	19.30	23.80	19.20	17.20	157.20
Cl-	mg/l	60.30	14.20	95.80	53.20	3.50	28.40	31.90	35.50	1164.40
SO4--	mg/l	250.10	135.40	187.70	187.70	0.00	135.40	135.40	124.80	667.70
HCO3-	mg/l	176.90	213.50	213.50	244.00	286.70	189.10	213.50	97.60	189.10
<b>RESULTADOS</b>										
Σ Aniones	meq/l	9.83	6.76	10.15	9.45	4.80	6.74	7.26	5.24	49.86
Σ Cationes	meq/l	9.51	6.69	10.20	10.24	4.73	6.51	7.28	5.62	50.74
Balance Iónico		-1.62%	-0.55%	0.24%	4.03%	-0.68%	-1.72%	0.18%	3.51%	0.87%

Continuación Tabla 5.8

MUESTRA	UNIDAD	IN-19_81	IN-20_81	IN-21_81	IN-22_81	IN-23_81	IN-24_81	IN-25_81
<b>IONES MAYORES</b>								
Na+	mg/l	24.40	34.30	20.00	106.00	32.00	63.50	78.40
K+	mg/l	0.40	0.40	0.40	0.40	0.80	0.40	0.40
Ca++	mg/l	102.00	192.00	54.00	119.00	117.00	45.00	62.00
Mg++	mg/l	22.10	18.60	13.40	51.00	25.90	30.00	19.80
Cl-	mg/l	21.30	80.70	7.10	131.30	28.40	42.60	28.40
SO4--	mg/l	145.90	281.30	104.20	354.70	313.00	31.20	104.20
HCO3-	mg/l	268.40	231.80	140.30	213.50	134.20	347.70	298.90
<b>RESULTADOS</b>								
Σ Aniones	meq/l	8.08	12.05	4.71	14.65	9.56	7.59	7.91
Σ Cationes	meq/l	7.98	12.61	4.68	14.75	9.38	7.49	8.14
Balance Iónico		-0.62%	2.28%	-0.35%	0.36%	-0.93%	-0.70%	1.45%

La Tabla 5.9 muestra los valores obtenidos de las muestras correspondientes al año 1994, las cuales fueron procesadas para determinar su Balance Iónico.

Tabla 5.9 Iones Mayores y balance iónico de muestras de 1994 (Galván-Mancilla, 1996).

MUESTRA	UNIDAD	SG-01_94	SG-02_94	SG-03_94	SG-04_94	SG-05_94	SG-06_94	SG-07_94
<b>IONES MAYORES</b>								
Na+	mg/l	39.92	0.00	18.90	25.80	51.25	34.00	19.34
K+	mg/l	1.80	0.00	1.10	2.10	0.02	1.23	1.21
Ca++	mg/l	147.00	135.80	137.90	200.20	215.55	245.86	147.00
Mg++	mg/l	14.30	8.00	7.70	10.70	9.48	10.82	9.30
Cl-	mg/l	62.00	25.40	26.90	40.20	46.44	37.55	105.50
SO4--	mg/l	141.00	221.80	226.70	298.70	319.09	380.30	236.00
HCO3-	mg/l	354.26	156.10	154.10	257.70	322.66	327.89	186.05
<b>RESULTADOS</b>								
Σ Aniones	meq/l	11.30	8.07	8.17	12.51	14.60	15.42	11.91
Σ Cationes	meq/l	10.29	7.43	8.37	12.05	13.77	14.67	8.97
Balance Iónico		-4.65%	-4.09%	1.18%	-1.87%	-2.94%	-2.51%	-14.08%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>								
Halita	NaCl	99.61		42.74	63.19	76.60	60.12	49.21
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	3.43	75.08	76.46	4.00	166.78	173.17	82.90
Silvita	KCl	161.32		2.10	144.67	0.04	2.35	2.31
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	108.29	60.58	58.31	81.03	71.79	81.94	70.43
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	199.93	314.50	321.44	423.53	452.45	539.24	334.63

Continuación Tabla 5.9

MUESTRA	UNIDAD	SG-08_94	SG-09_94	SG-10_94	SG-11_94	SG-12_94	SG-13_94	SG-14_94
<b>IONES MAYORES</b>								
Na+	mg/l	39.00	57.00	59.00	55.30	47.30	35.50	51.50
K +	mg/l	1.35	0.70	0.60	0.60	0.30	0.40	0.70
Ca++	mg/l	227.34	133.90	120.60	114.80	104.00	104.00	144.80
Mg++	mg/l	4.62	5.50	7.20	6.90	6.80	8.30	15.70
Cl-	mg/l	32.65	36.60	18.00	28.20	11.90	10.40	9.40
SO4--	mg/l	331.73	118.10	79.40	112.40	47.30	42.00	238.30
HCO3-	mg/l	295.23	329.60	357.90	329.60	321.30	312.90	252.30
<b>RESULTADOS</b>								
Σ Aniones	meq/l	14.02	10.61	9.17	10.18	7.73	7.55	11.43
Σ Cationes	meq/l	13.46	9.63	9.19	8.72	7.81	7.43	10.78
Balance Ionico		-2.05%	-4.83%	0.12%	-7.75%	0.54%	-0.80%	-2.96%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>								
Halita	NaCl	51.86	59.35	28.80	45.63	19.19	16.56	14.46
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	203.06	188.70	188.81	141.17	182.45	181.80	48.66
Silvita	KCl	2.57	1.34	1.14	1.14	0.57	0.76	1.34
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	34.99	41.65	54.53	52.25	51.50	62.86	118.90
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	470.37	167.46	112.58	159.38	67.07	59.55	337.89

Continuación Tabla 5.9

MUESTRA	UNIDAD	SG-15_94	SG-16_94	SG-17_94	SG-18_94	SG-19_94	SG-20_94	SG-21_94
<b>IONES MAYORES</b>								
Na+	mg/l	86.20	22.70	28.00	22.70	43.50	37.75	26.60
K +	mg/l	1.50	1.30	1.50	1.70	1.18	1.70	1.90
Ca++	mg/l	156.00	146.80	168.90	168.90	128.83	259.34	197.60
Mg++	mg/l	9.30	8.10	11.20	9.30	0.00	1.34	10.20
Cl-	mg/l	42.80	32.30	53.90	34.20	36.46	34.83	39.50
SO4--	mg/l	256.80	232.90	214.00	253.90	158.87	323.91	285.60
HCO3-	mg/l	195.20	184.70	211.20	208.20	249.51	273.67	250.00
<b>RESULTADOS</b>								
Σ Aniones	meq/l	10.50	9.17	10.47	10.11	9.04	13.18	11.98
Σ Cationes	meq/l	12.34	9.01	10.61	10.22	8.35	14.74	11.91
Balance Ionico		8.03%	-0.88%	0.63%	0.57%	-3.96%	5.59%	-0.31%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>								
Halita	NaCl	68.38	51.35	71.25	53.89	58.40	54.93	62.34
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	83.71	90.58	152.70	118.95	156.20	304.64	153.88
Silvita	KCl	2.86	2.48	2.86	3.24	2.25	3.24	3.62
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	70.43	61.34	84.82	70.43		10.15	77.25
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	364.12	330.23	303.44	360.01	225.27	459.28	404.96

Continuación Tabla 5.9

MUESTRA	UNIDAD	SG-22_94	SG-23_94	SG-24_94	SG-25_94	SG-26_94	SG-27_94	SG-28_94
<b>IONES MAYORES</b>								
Na+	mg/l	28.60	81.00	71.25	66.50	32.50	0.00	23.60
K+	mg/l	0.90	0.74	0.50	1.90	1.10	0.00	1.00
Ca++	mg/l	293.90	147.35	122.93	265.90	183.00	159.30	179.00
Mg++	mg/l	16.00	11.31	25.16	27.20	13.80	6.20	10.90
Cl-	mg/l	44.50	63.12	56.90	216.60	62.20	28.90	48.30
SO4--	mg/l	507.80	125.12	69.97	264.20	243.60	256.80	224.70
HCO3-	mg/l	175.70	411.49	276.94	275.20	232.20	182.00	223.20
<b>RESULTADOS</b>								
Σ Aniones	meq/l	15.49	12.67	9.53	18.59	11.60	9.32	10.70
Σ Cationes	meq/l	17.25	11.83	11.32	18.45	11.71	8.46	10.88
Balance Ionico		5.36%	-3.43%	8.57%	-0.37%	0.48%	-4.86%	0.84%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>								
Halita	NaCl	72.08	103.05	93.14	169.22	82.70		60.05
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	138.96	191.05	130.50	276.76	146.36	104.71	168.01
Silvita	KCl	1.72	1.41	0.95	3.62	2.10		1.91
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	121.17	85.65	190.54	205.99	104.51	46.95	82.55
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	720.02	177.41	99.21	374.62	345.41	364.12	318.61

Continuación Tabla 5.9

MUESTRA	UNIDAD	SG-29_94	SG-30_94	SG-31_94	SG-32_94	SG-33_94	SG-34_94
<b>IONES MAYORES</b>							
Na+	mg/l	53.80	39.90	15.80	82.00	43.50	65.00
K+	mg/l	0.60	1.80	0.60	0.80	0.60	0.70
Ca++	mg/l	106.10	146.50	115.80	225.70	120.40	128.00
Mg++	mg/l	13.60	14.30	13.20	17.00	4.90	4.50
Cl-	mg/l	32.20	62.00	15.40	106.10	19.80	29.40
SO4--	mg/l	122.70	141.00	72.40	183.60	103.70	140.40
HCO3-	mg/l	240.60	345.20	326.10	361.70	268.90	307.00
<b>RESULTADOS</b>							
Σ Aniones	meq/l	8.34	11.15	8.04	14.28	8.41	9.61
Σ Cationes	meq/l	8.77	10.27	7.57	16.25	8.32	9.60
Balance Ionico		2.53%	-4.11%	-3.05%	6.45%	-0.55%	-0.02%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>							
Halita	NaCl	52.24	99.61	24.51	173.88	31.77	47.47
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	81.12	160.07	159.41		172.46	154.84
Silvita	KCl	1.14	3.43	1.14	1.53	1.14	1.34
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	102.99	108.29	99.96	128.74	37.11	34.08
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	173.98	199.93	102.66	260.33	147.04	199.08

La Tabla 5.10 presenta los valores obtenidos para las muestras colectadas en el año 2009. Los valores de las muestras de los demás años (2000-2008), están integradas al SIG y por su amplitud no es posible plasmarlas en el cuerpo del presente documento, pero sus valores son utilizados para determinar la caracterización y la calidad del AS así como para los siguientes análisis desarrollados en los siguientes capítulos.

Tabla 5.10 Iones Mayores y balance iónico de muestras de 2009.

MUESTRA	UNIDAD	RD-01_09	RD-02_09	RD-03_09	RD-04_09	RD-05_09	RD-06_09	RD-07_09	RD-08_09
<b>IONES MAYORES</b>									
Na+	mg/l	103.32	41.86	27.46	176.03	126.87	271.64	67.30	12.91
K +	mg/l	23.18	2.99	3.23	2.75	1.17	17.15	1.29	1.00
Ca++	mg/l	225.70	157.77	181.49	375.26	270.90	542.76	149.74	84.33
Mg++	mg/l	24.49	21.04	9.65	36.77	30.28	143.85	14.26	7.38
Cl-	mg/l	216.81	135.22	24.48	521.08	128.63	708.23	64.13	3.67
SO4--	mg/l	165.30	343.16	240.16	307.68	349.71	201.42	94.88	17.63
HCO3-	mg/l	291.70	63.80	258.30	315.00	380.70	326.20	334.00	252.10
<b>RESULTADOS</b>									
Σ Aniones	meq/l	15.23	12.09	10.17	27.49	19.93	50.39	9.73	4.63
Σ Cationes	meq/l	19.26	11.58	11.18	29.71	21.70	51.66	11.69	5.42
Balance Ionico		11.67%	-2.15%	4.72%	3.87%	4.27%	1.25%	9.15%	7.90%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>									
Halita	NaCl	262.90	106.51	35.56	447.92	210.50	691.20	103.90	4.56
Silvita	KCl	44.19	5.69	6.15	5.25	2.24	32.69	2.45	1.91
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	290.60		163.26	465.19	187.47	553.34	216.38	161.87
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	185.46	67.01	73.09	278.43	229.30	1089.35	108.00	55.85
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	234.38	486.58	340.53	436.27	495.86	285.60	134.54	24.99

Continuación Tabla 5.10

MUESTRA	UNIDAD	RD-09_09	RD-10_09	RD-11_09	RD-12_09	RD-13_09	RD-14_09	RD-15_09	RD-16_09
<b>IONES MAYORES</b>									
Na+	mg/l	43.55	19.37	19.58	41.68	32.44	7.88	14.49	49.78
K +	mg/l	2.22	2.32	0.57	0.93	1.27	0.62	1.18	7.26
Ca++	mg/l	208.42	131.21	90.15	192.45	148.75	90.44	125.34	201.10
Mg++	mg/l	13.31	7.64	6.69	19.63	13.92	6.02	6.63	11.70
Cl-	mg/l	80.36	17.96	10.99	54.68	44.40	3.06	5.68	57.73
SO4--	mg/l	267.38	163.91	40.12	351.34	180.25	26.15	26.72	169.72
HCO3-	mg/l	252.80	200.40	219.30	197.30	218.20	243.20	323.90	359.80
<b>RESULTADOS</b>									
Σ Aniones	meq/l	12.53	7.31	5.06	12.53	9.00	4.65	6.21	11.72
Σ Cationes	meq/l	13.50	8.12	5.94	13.12	10.06	5.38	7.49	13.41
Balance Iónico		3.72%	5.22%	8.01%	2.32%	5.56%	7.31%	9.31%	6.74%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>									
Halita	NaCl	110.82	26.16	17.28	88.83	71.37	4.12	7.60	84.41
Silvita	KCl	4.22	4.43	1.10	1.78	2.42	1.19	2.25	13.84
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	187.08	125.42	155.80	33.67	126.34	173.81	257.88	277.21
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	100.80	57.86	50.67	148.67	105.45	45.62	50.22	88.62
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	379.13	232.41	56.89	498.18	255.58	37.08	37.89	240.65

Continuación Tabla 5.10

MUESTRA	UNIDAD	RD-17_09	RD-18_09	RD-19_09	RD-20_09	RD-21_09	RD-22_09	RD-23_09
<b>IONES MAYORES</b>								
Na+	mg/l	75.90	43.37	93.00	32.37	22.31	22.36	24.56
K +	mg/l	2.89	4.34	1.72	0.61	1.58	1.13	1.18
Ca++	mg/l	243.60	209.59	159.97	221.24	159.53	145.72	189.82
Mg++	mg/l	23.60	17.39	23.44	15.11	8.51	8.49	9.67
Cl-	mg/l	157.60	54.33	89.05	26.77	22.20	18.70	23.57
SO4--	mg/l	171.57	345.21	65.73	249.39	183.16	167.06	215.16
HCO3-	mg/l	347.30	236.20	421.30	324.50	238.00	226.60	288.60
<b>RESULTADOS</b>								
Σ Aniones	meq/l	14.77	13.10	11.63	11.43	8.64	7.89	10.07
Σ Cationes	meq/l	17.58	13.95	14.14	13.77	9.71	9.00	11.40
Balance Iónico		8.70%	3.12%	9.77%	9.30%	5.84%	6.61%	6.19%
<b>MINERALES DISUELTOS</b>								
Halita	NaCl	193.13	83.15	144.36	43.26	34.27	29.16	37.12
Silvita	KCl	5.52	8.27	3.29	1.15	3.01	2.15	2.25
Carbonato	CaCO <sub>3</sub>	332.41	92.11	234.50	230.42	172.54	154.91	210.05
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	178.74	131.69	177.54	114.45	64.42	64.28	73.22
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	243.27	489.48	93.20	353.62	259.70	236.88	305.08

## 5.8 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

### 5.8.1 Distribución de parámetros físicos y especies hidrogeoquímicas

La información fisicoquímica fue concentrada en el SIG, con el fin de establecer la variación espacial de los parámetros. Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran la distribución de la temperatura (°C) y la conductividad eléctrica (μS/cm) para las muestras del año 2009. Para evitar incertidumbre en la distribución de los parámetros físicos y especies hidroquímicas, se definió un nuevo perímetro de análisis denominado Limite de Análisis Hidrogeoquímico (LAH), que enmarca los puntos de muestreo y evita la interpolación en áreas extensas sin presencia de puntos de muestreo. Se utilizó el método de clasificación estadística "Natural Breaks (Jenks)", (ESRI, 2009c; Jenks, 1967).

Los valores mínimos de temperatura (T) se observan en la zona oeste y noreste de la cuenca que representan las zonas aledañas a la SMO ubicada el oeste del LAH con T ~ 19°C. Los valores máximos se presentan en la zona central y en dirección oriente, coincidiendo con la ubicación de las urbes. Los valores de conductividad eléctrica (CE) se incrementan de oeste a este hacia la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM), específicamente en la zona central y noreste del LAH. Este comportamiento es explicable en función del modelo propuesto por Tóth (1999), quien indicó que la T y la CE se incrementan desde aguas relacionadas a flujo local a aquellos bajo un sistema de flujo regional (Tóth, 1999).

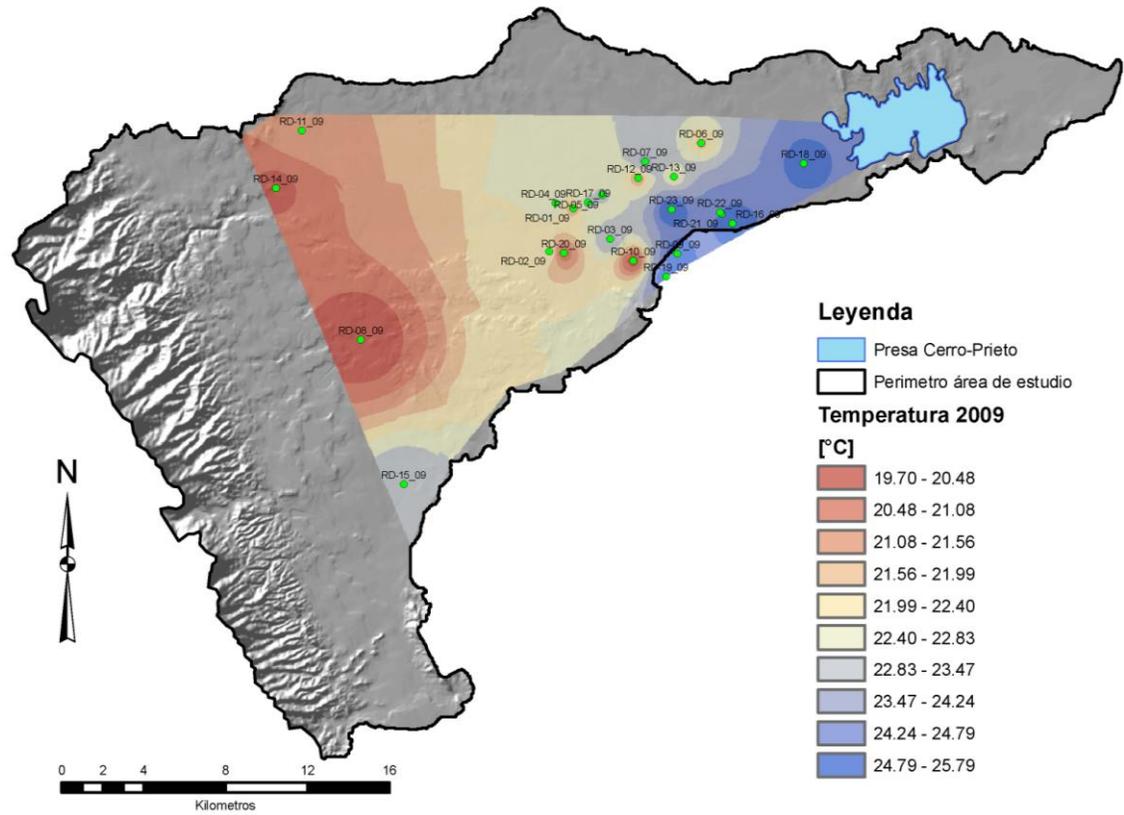


Figura 5.11 Distribución de la Temperatura °C

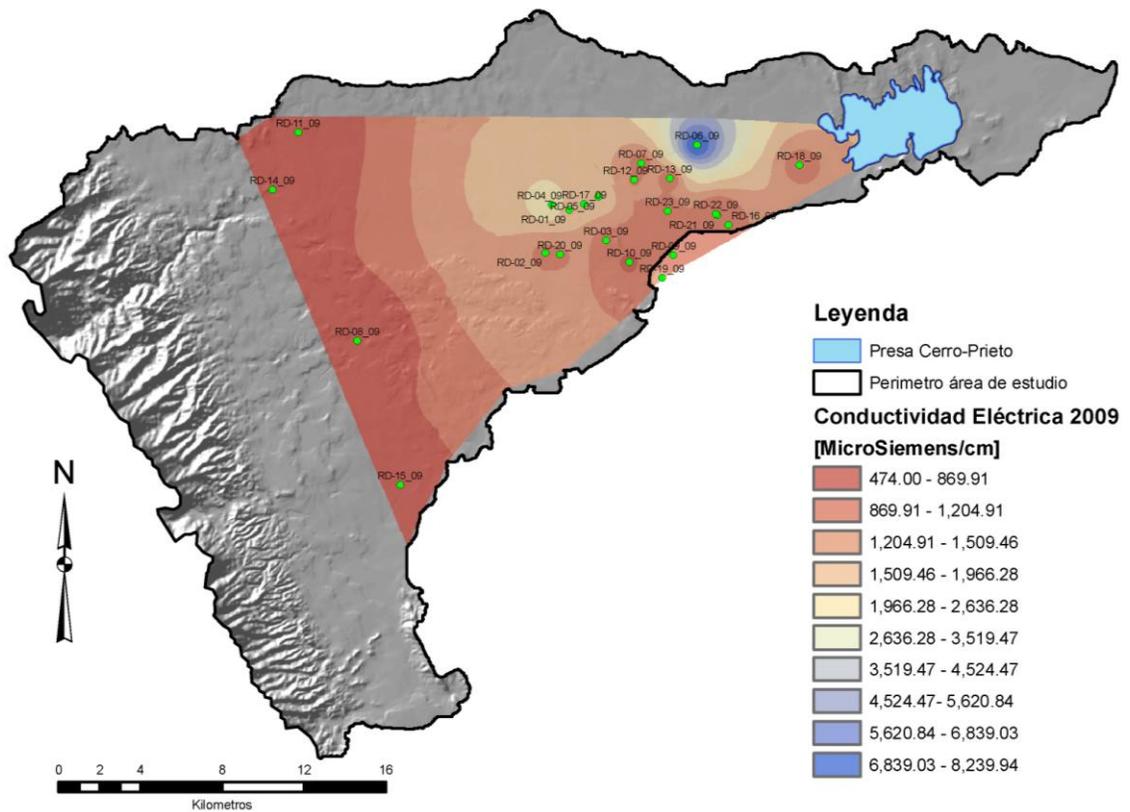


Figura 5.12 Distribución de la Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

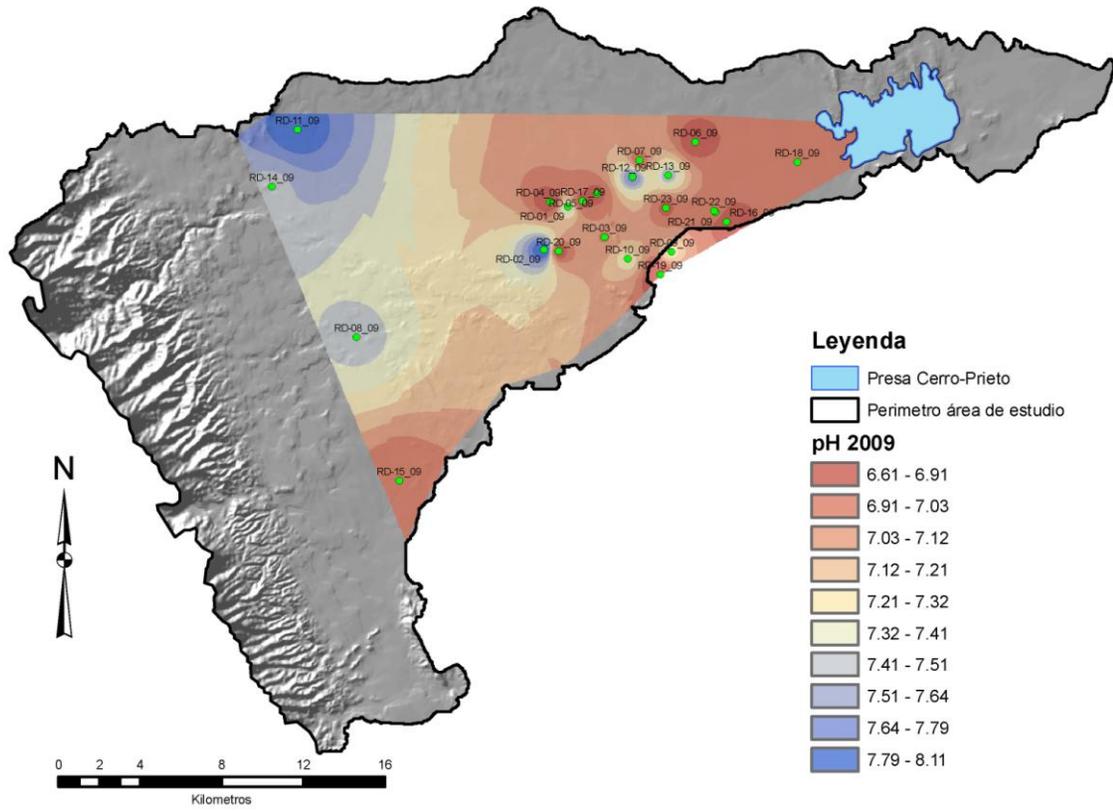


Figura 5.13 Distribución del pH en 2009

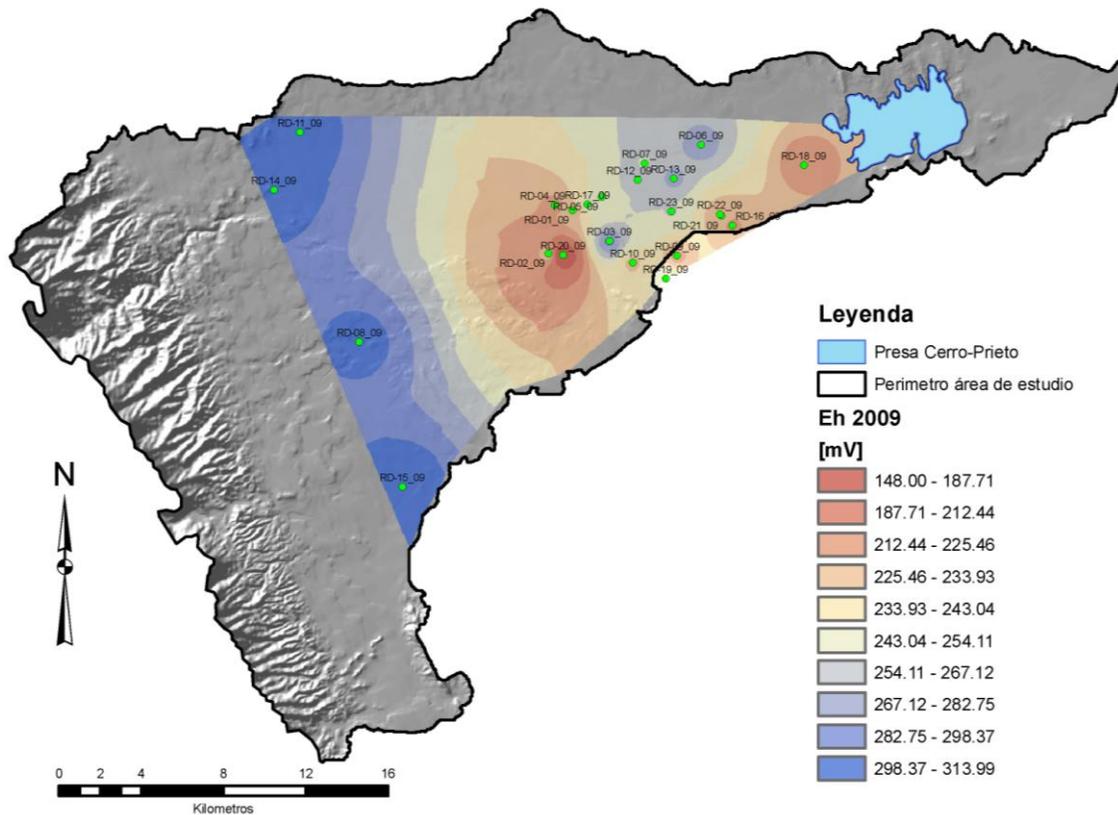


Figura 5.14 Distribución del Eh en 2009

### 5.8.2 Sólidos totales disueltos

### 5.8.3 Cationes

#### 5.8.3.1 Sodio

La distribución de sodio (Figura 5.15) evoluciona en dirección este, el valor más alto para el 2009 es en la muestra 06 (La Escondida), los valores de fondo están distribuidos en la zona oeste muestras (11; 14; 08 y 15), la zona central presenta una anomalía en el valor de la muestra 04 (~9 meq/l).

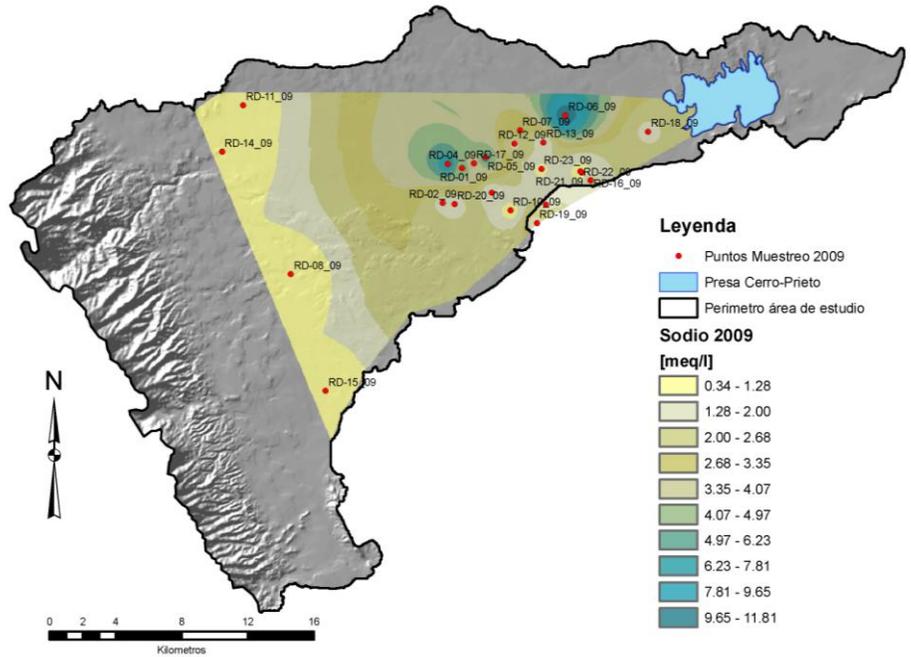


Figura 5.15 Distribución de Sodio

#### 5.8.3.2 Potasio

La Figura 5.16 muestra la distribución del potasio la cual oscila entre 0.01 meq/l (zona poniente con valores de fondo) y 0.58 meq/l (zona con hidrogeoquímica evolucionada al oriente). El valor más alto se registró en la muestra 06, cerca a la PCP. La muestra 01 en la zona central presenta un valor mayor que el de muestras vecinas.

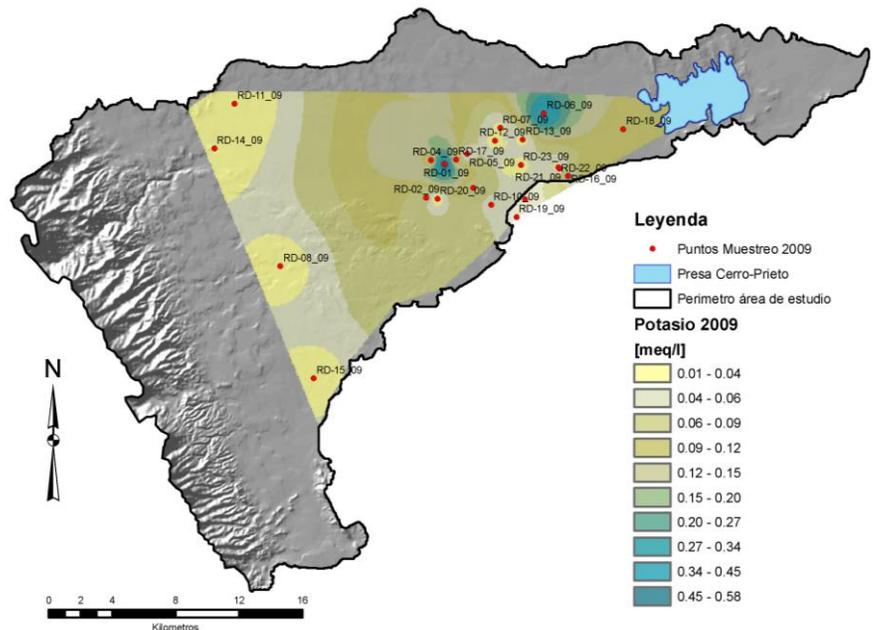


Figura 5.16 Distribución de Potasio

### 5.8.3.3 Calcio

El calcio se encuentra distribuido con valores menores al oeste y en la parte centro sur, en las regiones centro norte y noreste del LAH se presenta una zona con los valores más altos que alcanzan ~27 meq/l (Figura 5.17). La evolución del contenido del calcio es de oeste a noreste.

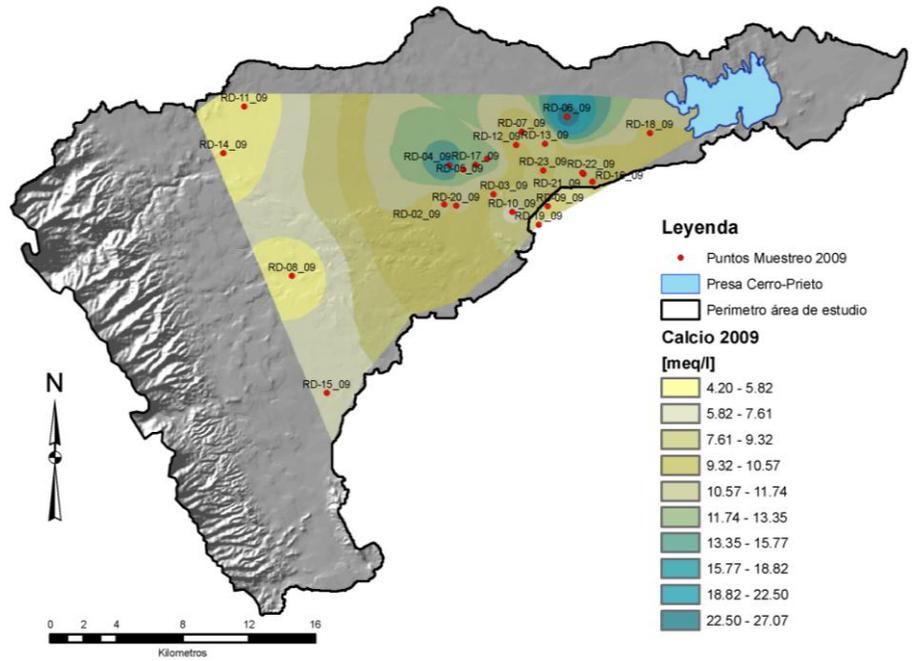


Figura 5.17 Distribución de Calcio

### 5.8.3.4 Magnesio

La Figura 5.18, representa la distribución del magnesio, el cual presenta valores de fondo en la zona centro-sur (muestras 20, 10, 23, 22 y 16) y oeste (muestras 11, 14, 08 y 15) del LAH, el valor más alto se localiza en la muestra 06 al noreste del LAH. La parte central norte, tiene valores intermedios, motivo por el que se observa un incremento en el contenido de Magnesio hacia el este.

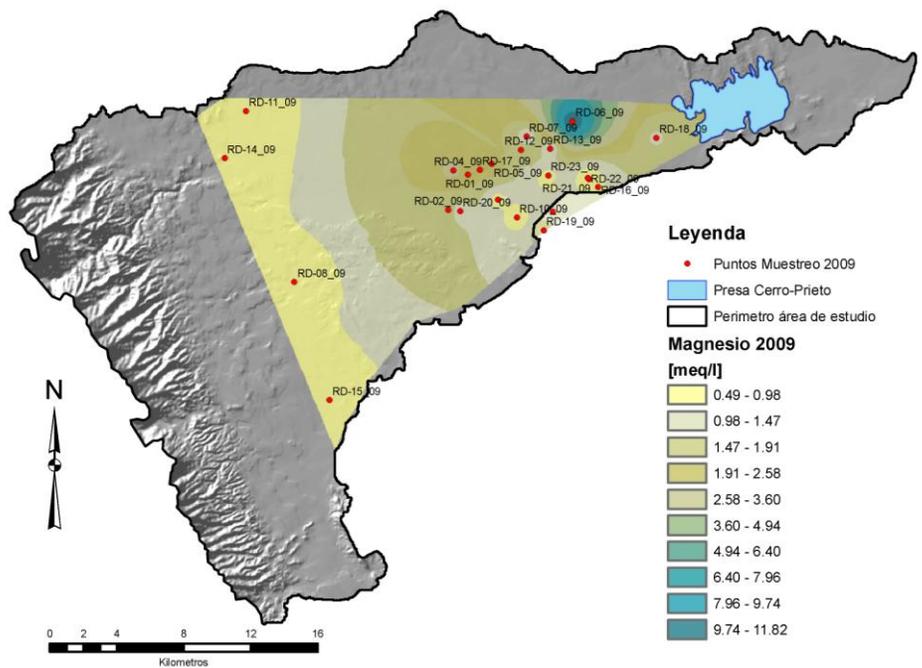


Figura 5.18 Distribución de Magnesio

### 5.8.4 Aniones

#### 5.8.4.1 Cloruros

Los contenidos de cloruro incrementan sus valores de oeste a este, los valores de fondo son las muestras 15, 08, 14, 11 (oeste), 03, 10, 23 y 22 (zona central-sur). Una anomalía se presenta en la zona central (muestra 09) que presenta un contenido mayor que las muestras circundantes a la misma (Figura 5.19).

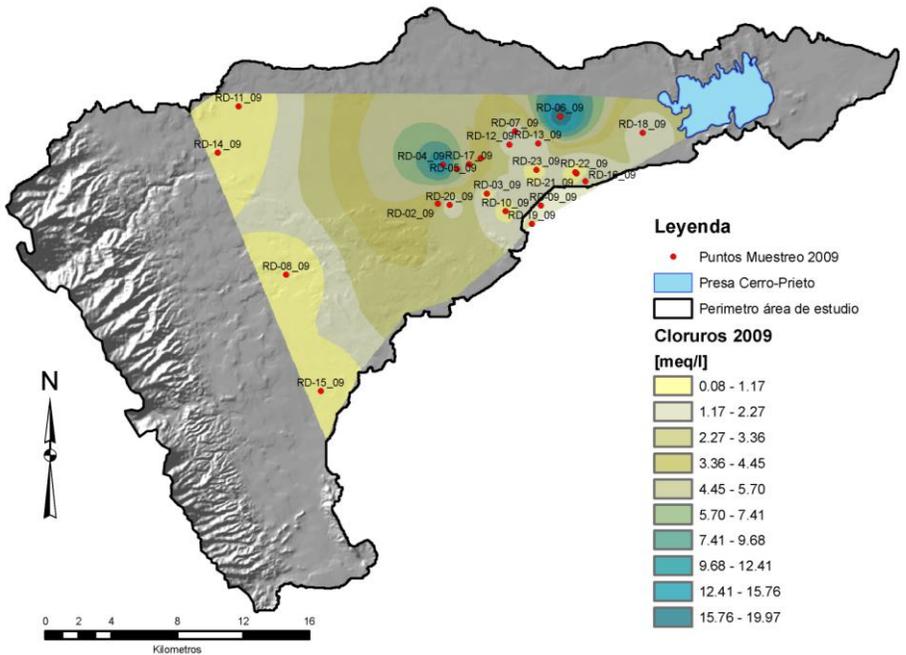


Figura 5.19 Distribución de Cloruros

#### 5.8.4.2 Sulfatos

La Figura 5.20 presenta la distribución de los sulfatos en el LAH, los valores de fondo están representados por las muestras 11, 14, 8 y 15 al oeste. En la zona central existe la presencia de valores altos en las muestras 20, 02, 05, 04, 17, 12 y 09. La muestra 18 (este) también tiene valores alto, panorama que muestra una anomalía en la parte central dentro del proceso de mineralización natural del AS.

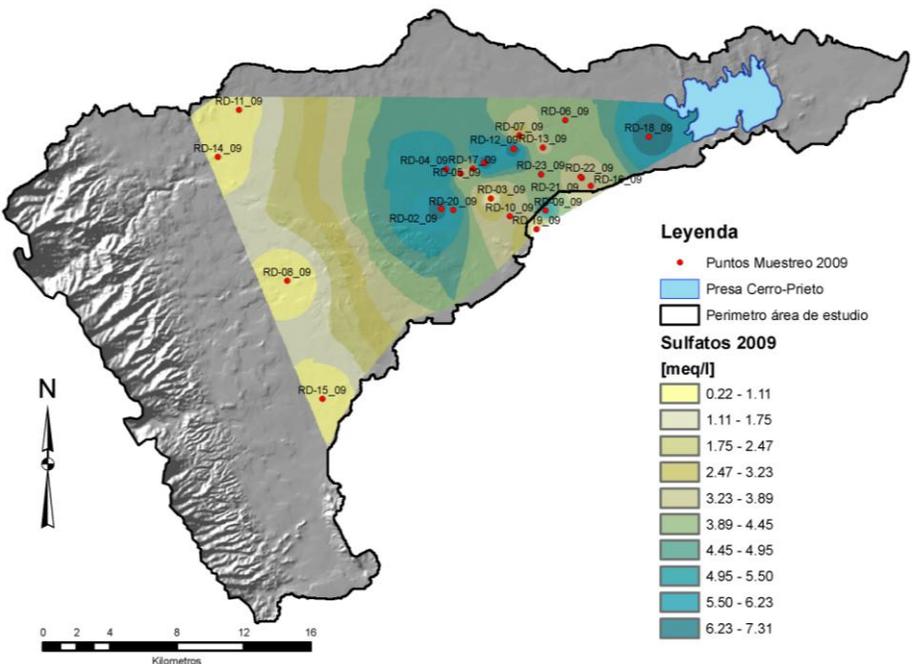


Figura 5.20 Distribución de Sulfatos

### 5.8.4.3 Bicarbonatos

Los bicarbonatos se encuentran distribuidos en dos zonas con valores máximos que se ubican en el sector suroeste (muestra 15) y noreste (muestras 06, 07, 17 y 15). El valor mínimo se encuentra en la zona central (muestra 20) y las zonas con valores bajos están al este (muestra 18), al noroeste (muestras 11 y 14) y al oeste (muestra 08), (Figura 5.21).

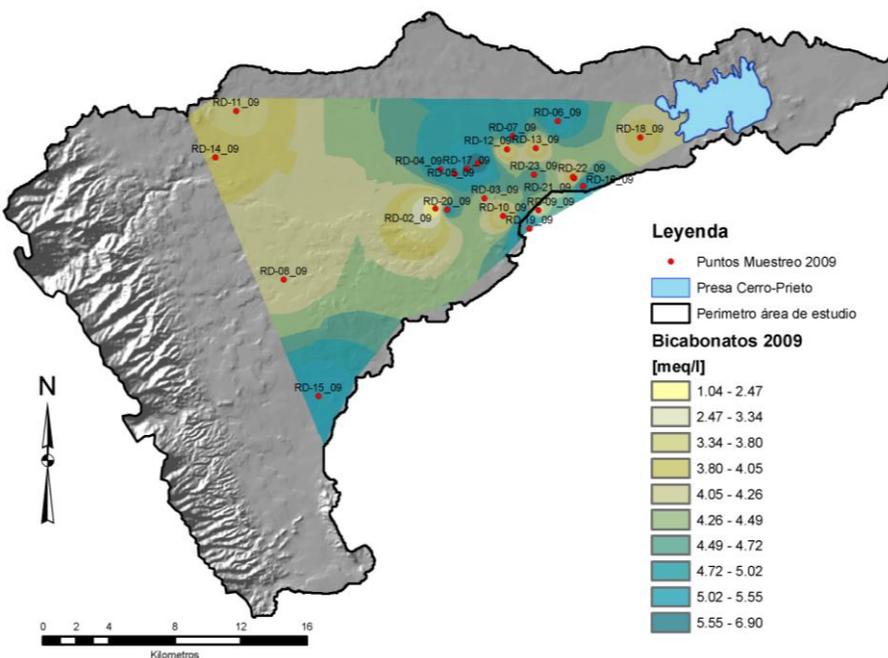


Figura 5.21 Distribución de Bicarbonatos

### 5.8.5 Caracterización del agua subterránea

La caracterización del AS se realizó utilizando el diagrama de Piper incluyendo la modificación propuesta por Davis (1971). Con este análisis es posible determinar la potabilidad del AS (Davis y De Wiest, 1971; Piper, 1994).

El Diagrama de Piper permitió realizar la clasificación del AS de una manera sencilla, se analizaron las muestras de los años 1981, 1994 y 2009 con la finalidad de conocer la evolución de la calidad química del AS a través del tiempo (28 años).

Tabla 5.11 Calidad de agua subterránea entre 1981 y 2009

Año	Muestra	Calidad Inicial	Muestra	Calidad final
1981	IN-14_81	Ca-Mg-Na-HCO <sub>3</sub>	IN-18_81	Ca-Na-Mg-Cl-SO <sub>4</sub>
1994	SG-12_94	Ca-Na-HCO <sub>3</sub>	SG-22_94	Ca-SO <sub>4</sub>
2009	RD-08_09	Ca-HCO <sub>3</sub>	RD-02_09	Ca-SO <sub>4</sub> -Cl

En las Figuras 5.22-24, el área enmarcada por la línea azul es la zona que caracteriza al agua potable, entre las líneas azul y roja se encuentran aguas que representan menos del 10% de agua potable y el área fuera de la línea roja representa aguas no potables.

La Figura 5.22 muestra la distribución de la calidad química del AS para las muestras tomadas en 1981, el 8% de las muestras es no potable, el 32% corresponde a las muestras donde menos del 10% es agua potable y el 60% de las muestras esta dentro de la categoría que caracteriza las aguas potables. La calidad inicial del AS está representada por la muestra IN-14\_81 ubicada al oeste del LAH y la calidad final del AS es la muestra IN-18\_81 ubicada en la zona este del LAH.

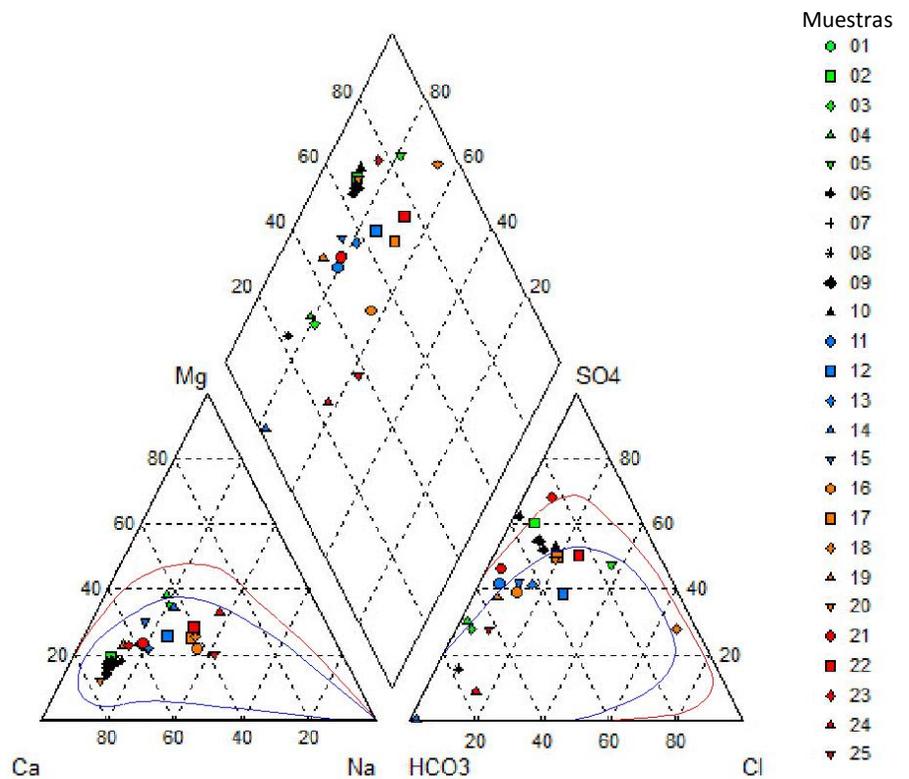


Figura 5.22 Diagrama de Piper, año 1981 (Muestras tabla 5.8).

Para las muestras colectadas en el año 1994 (Figura 5.23), se tiene una distribución química del AS representada por una calidad inicial del AS (muestra SG-12\_94) considerada como valor de fondo Ca-Na-HCO<sub>3</sub> en condiciones naturales, la misma que evoluciona a una calidad final (muestra SG-22\_94) Ca-SO<sub>4</sub> donde aparentemente existe un desbalance en los contenidos iónicos de las muestras de esta calidad. El 5.9% de las muestras no es potable, el 26.6% cae dentro del perímetro del menos 10% de potabilidad del agua y el 67.5% del total de muestras es considerada agua potable.

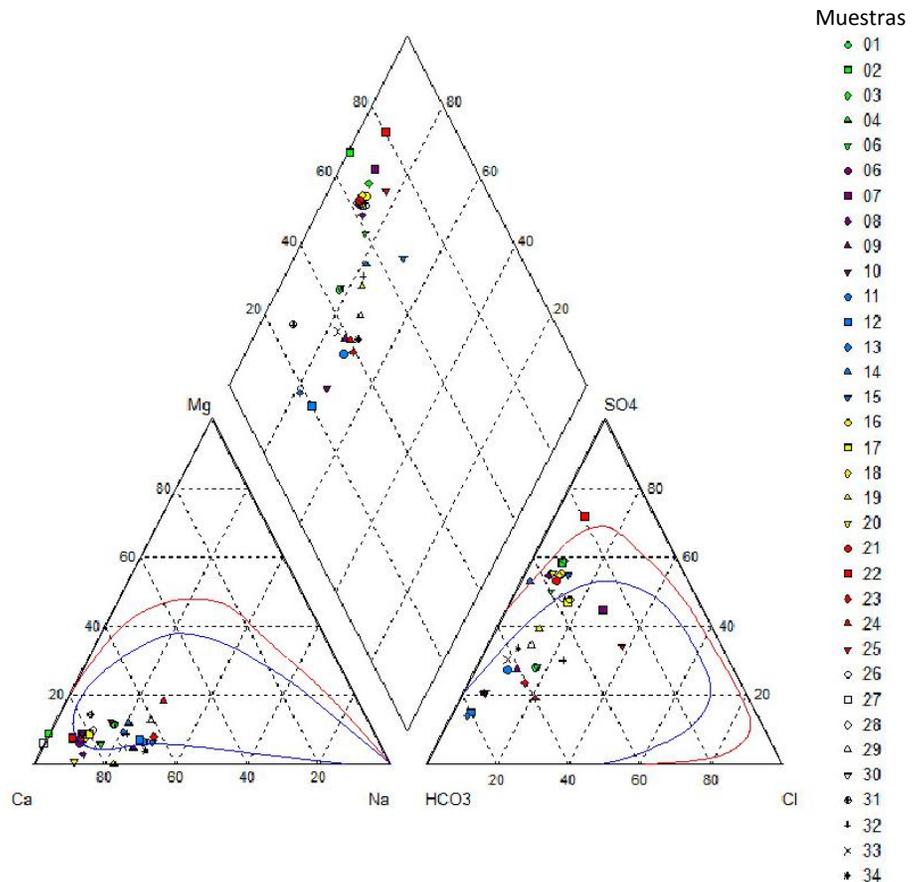


Figura 5.23 Diagrama de Piper, año 1994 (Muestras tabla 5.9).

En el año 2009, la condición inicial del AS (valor de fondo) identificado por la muestra RD-08\_09 la calidad del agua es Ca-HCO<sub>3</sub> que se localiza en la zona central-oeste del LAH y la calidad final es de tipo Ca-SO<sub>4</sub>-Cl (muestra RD-02\_09), denotando un cambio más marcado para la situación presente. Con respecto a la potabilidad: el 4.4% de las muestras es no potable, el 30.4% cae dentro del perímetro del menos 10% de potabilidad del agua y un 65.2% es agua potable (Figura 5.24).

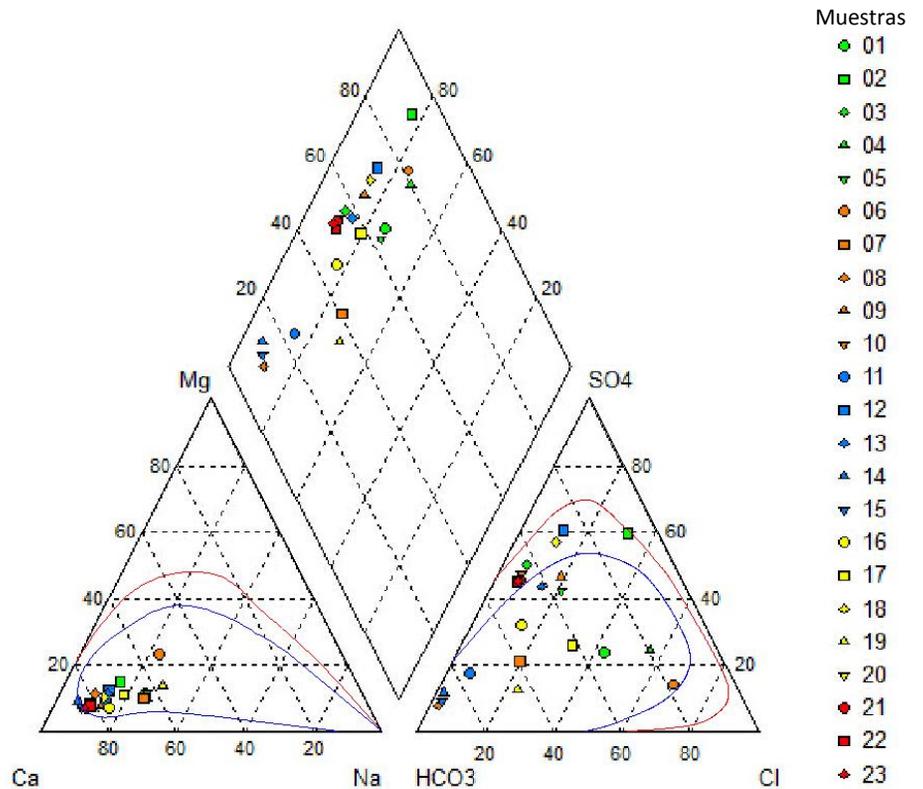


Figura 5.24 Diagrama de Piper, año 2009 (Muestra tabla 5.10).

### 5.8.6 Análisis Multivariado

La interpretación y presentación de resultados hidrogeoquímicos normalmente incluyen histogramas, diagramas trilineares y semilogarítmicos. Estos métodos manejan un número limitado de variables responsables de la química del AS (Hem, 1989; Lloyd y Heathcote, 1985).

Para considerar un mayor número de variables, se ha incorporado en el campo de la hidrogeoquímica el uso de técnicas de análisis multivariado. Se utilizó el método de cluster jerárquico, el cual se llevó a cabo utilizando el software STATISTICA for WINDOWS 5.0 (Statsoft, Inc., 2005), (Davis, 1996; Eriksson, 1985).

Garza-Tamez (2009) explica el desarrollo de este método que consiste en utilizar información de una serie de variables hidrogeoquímicas  $i$  para cada muestra  $j$ , a fin de establecer la similitud, las  $N$  muestras se distribuyen en grupos que estadísticamente son homogéneos internamente, pero que son diferentes entre sí. La distribución estadística de las muestras deberá ser consistente con un patrón espacial dentro de la cuenca y explicable a partir de un modelo

hidrogeoquímico teórico. El proceso se inicia con una normalización de los datos  $X_{ij}$  donde cada dato estandarizado  $K_{ij}$  se calcula por medio de la ecuación:

$$K_{ij} = \frac{X_{ij} - X}{S_{ic}} \quad (5.2)$$

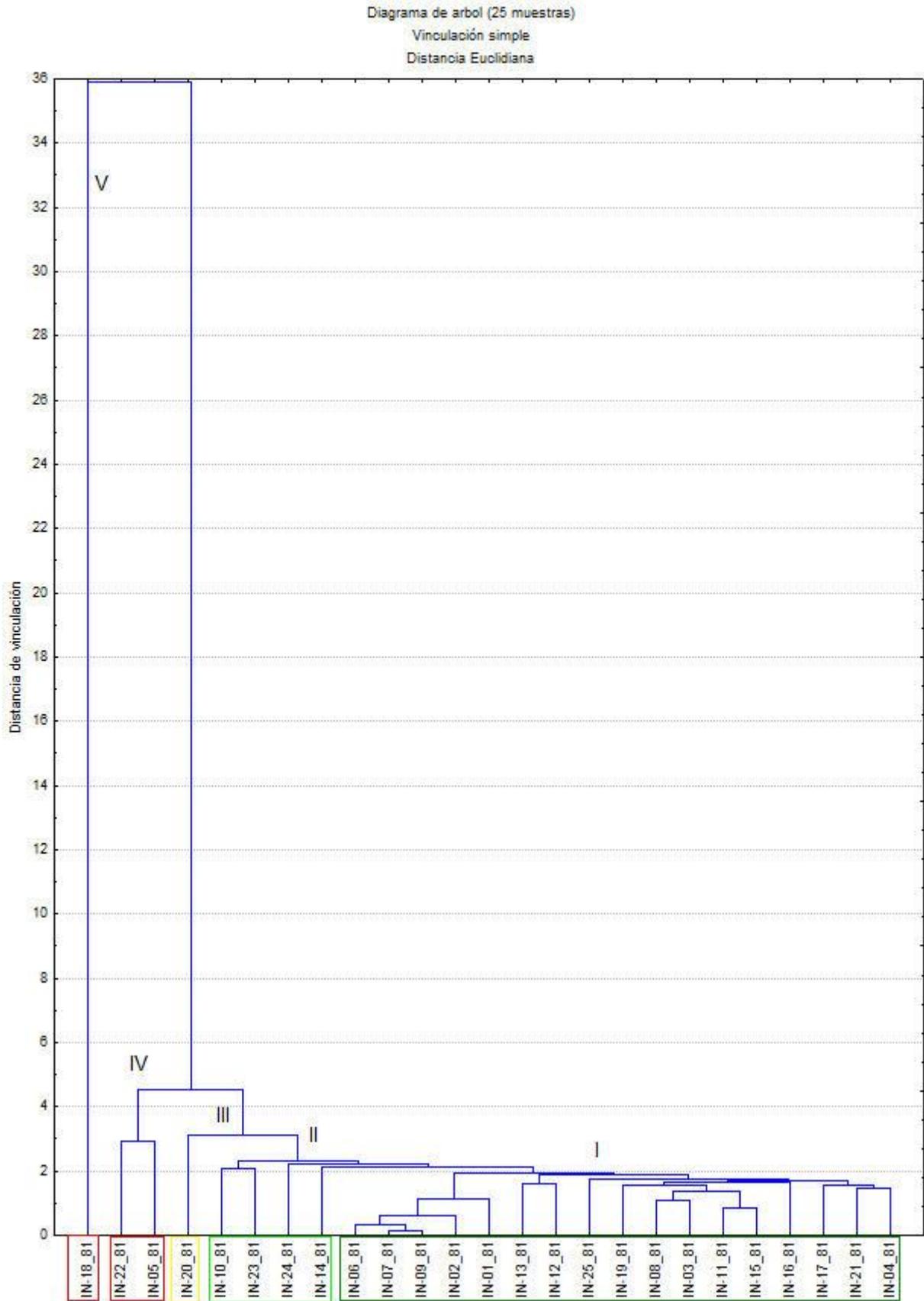
Donde el subíndice  $ij$  representa la  $i$ -ésima variable para la  $j$ -ésima muestra y  $S_{ic}$  es la desviación estándar de la variable  $X$ . Esta fórmula da el mismo peso para cada variable, la medida de similitud es definida como la Distancia Euclidiana (DE) simple (Eriksson, 1985). Esta distancia de conexión de la variable entre dos muestras ( $j,k$ ) está dada por la ecuación:

$$d_{jk} = \left[ \sum_{i=1}^N (K_{ij} - K_{ik})^2 \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

Donde  $K_{ij}$  representa la medición de la variable  $i$  en la muestra  $j$ , mientras que  $K_{ik}$  es la medición de la variable  $i$  en la muestra  $k$ . Una vez obtenidos los datos normalizados y la distancia de conexión entre cada una de las muestras, se generaron dendogramas para cada serie de muestras. Estos diagramas fueron interpretados y se estableció una clasificación espacial de los clusters para el área de estudio, las Figuras 5.16 – 5.20 muestran el comportamiento espacial de los grupos encontrados.

La Figura 5.25 presenta el dendograma generado para las muestras colectadas en 1981, luego de realizar el análisis se determinaron 5 clusters (Grupos I, II, III, IV y V), donde predomina el Grupo I con distancias euclidianas menores a 2 (17 muestras representando un 68% de cobertura), el Grupo II contiene 4 muestras y representa el 16% de cobertura (DE entre 2 y 3), el Grupo III con 1 muestra y cobertura del 4% (DE <3 y >2), 2 muestras componen el Grupo IV, representa un 8% de cobertura y tiene una DE entre 4 y 5, finalmente el Grupo 5 (1 muestra) representa el 4% de cobertura con una DE ~36.

Realizando el mismo análisis para las muestras de 2009, se tienen los siguientes resultados (Figura 5.26). Se identificaron 5 Grupos (I, II, III, IV y V). Los Grupos V y IV con DE de ~24 y ~12 respectivamente, una muestra y 4.35% de cobertura para ambos grupos. El Grupo III tiene una cobertura de 17.39%, contiene 4 muestras y un DE >3; el grupo mayoritario de esta serie de datos es el Grupo II con 12 muestras que significan 52.18% de cobertura y tienen una DE <3; El grupo I con DE <3 representa el 21.73% de cobertura y conformado por 5 elementos. Es importante denotar que la diferencia principal entre los grupos I y II es la homogeneidad de las muestras de cada grupo, ambos grupos tienen casi la misma DE.



**Figura 5.25** Dendrograma generado a partir del análisis de cluster jerárquico, muestras de 1981.

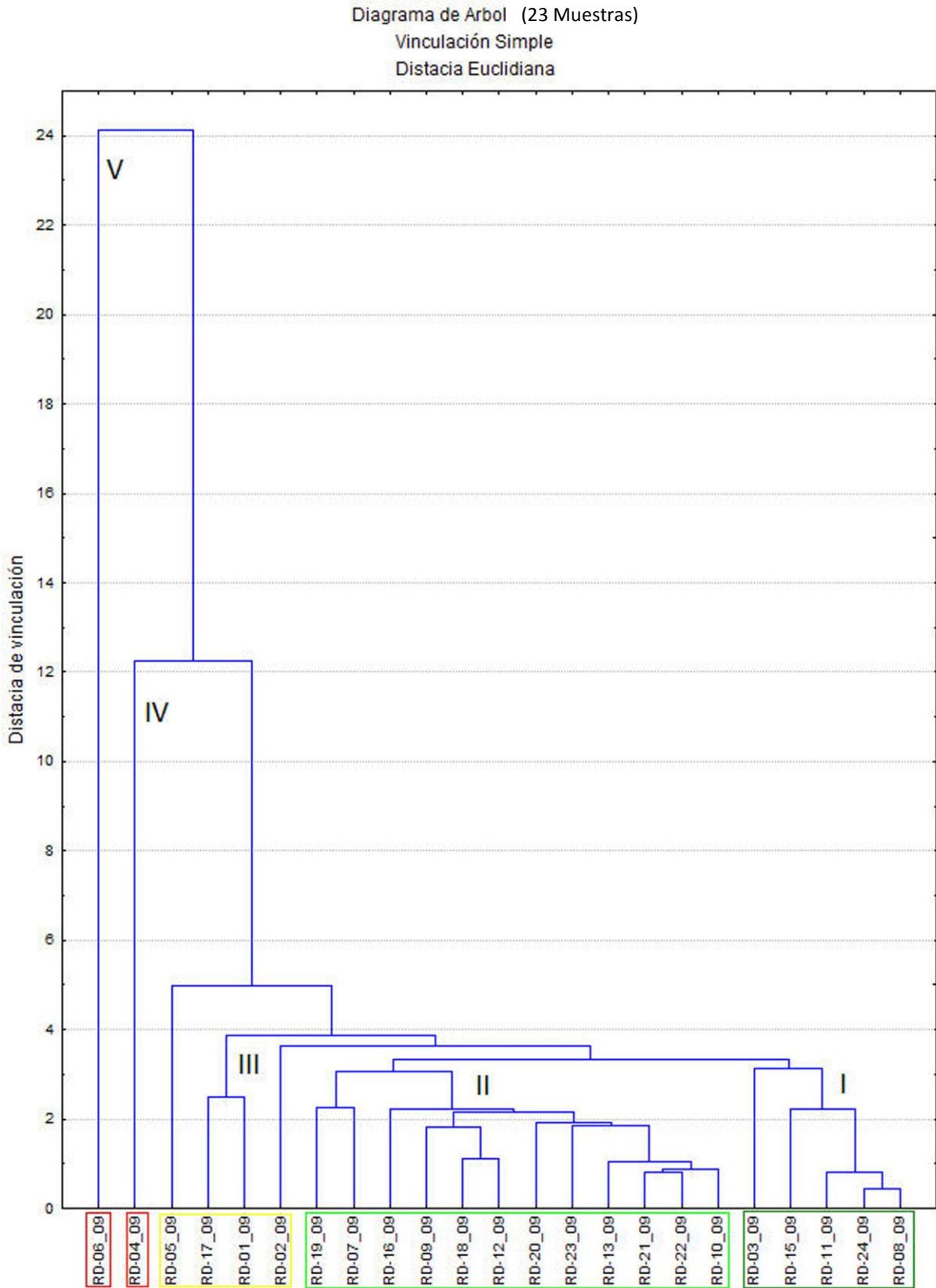
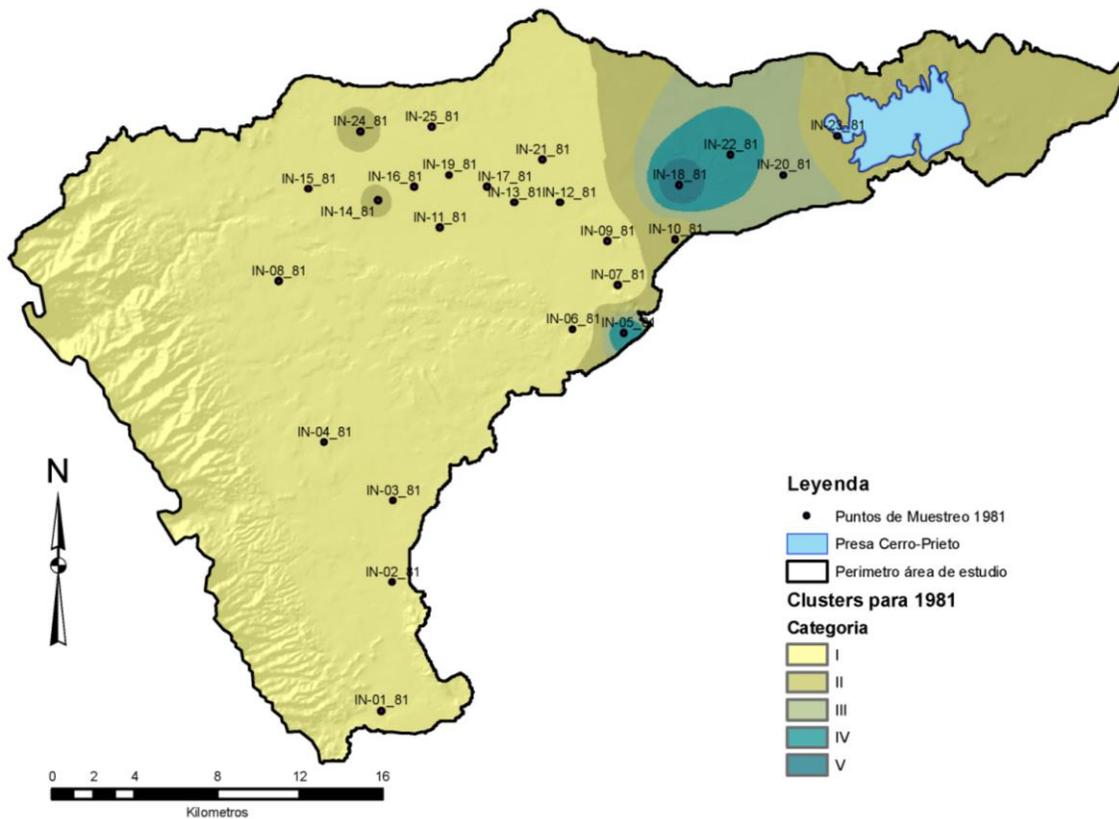


Figura 5.26 Dendrograma generado a partir del análisis de cluster jerárquico, muestras de 2009.

La configuración espacial de los grupos identificados en el análisis multivariado por cluster jerárquico se obtuvo interpolando los valores de cada grupo por el método "Inverse Distance Weight (IDW)", porque tiene la cualidad de mostrar la importancia relativa de cada punto analizado con los demás puntos que forman parte de la interpolación. La clasificación de los valores interpolados de cada celda (10 m de lado) se realizó por el método Natural Breaks (Jenks) debido a que denota las diferencias entre cada clase. Los resultados para los años 1981 y 2009 se presentan en las Figura 5.27 y %.28 respectivamente.

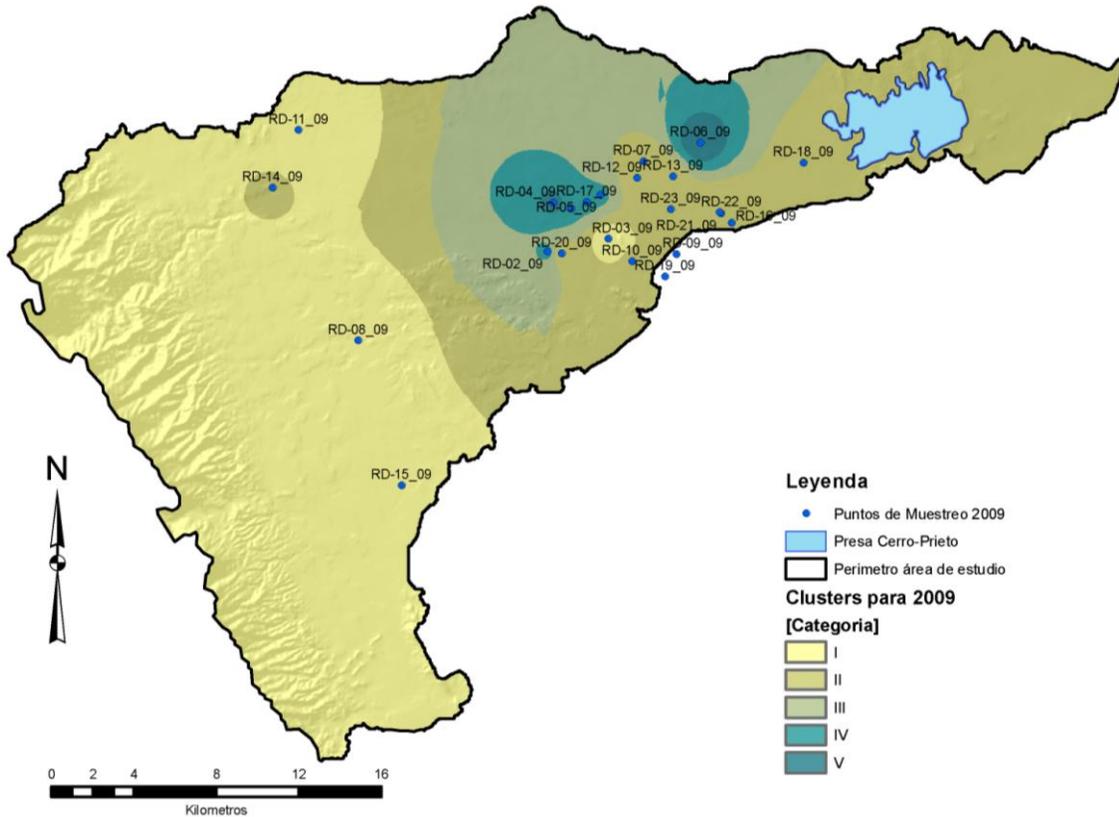
Para el caso del año 1981, es clara la predominancia del Grupo I que cubre la mayor parte del área, la cual se extiende desde el sector sur, suroeste y noroeste abarcando más de la mitad del área de estudio. El grupo II tiene menor cobertura identificándose 2 sectores importantes una en el extremo este y otro en la zona central del área estudiada, el grupo III está ubicado en el sector centro-este y en su interior contiene los grupos IV y V que tienen forma ovalada (Figura 5.27).



**Figura 5.27** Distribución de los grupos identificados en el análisis de clusters, caso 1981

Para el año 2009 la distribución de los grupos varía notablemente (Figura 5.26), la principal modificación es una reducción notable del área cubierta por la categoría I. Dicha pérdida está justificada por el crecimiento notable del grupo II el cual se extiende desde la zona central hasta el

extremo oriente del área de estudio. El grupo III se extiende desde el sector central hacia el borde norte, en su interior contiene 2 sectores del grupo IV el mayor de ellos (mas hacia el noreste) contiene el grupo V entendiéndose con dirección norte hacia el borde superior del área bajo investigación.



**Figura 5.28** Distribución de los grupos identificados en el análisis de clusters, caso 2009

La aplicación del análisis multivariado permitió identificar, distinguir y evaluar diversas facies hidrogeoquímicas dentro de un sistema de cuenca, tal como lo han propuesto Stuyfzand, 1999 y Tóth, 1999 (Stuyfzand, 1999; Tóth, 1999). Esta información podrá ser utilizada durante la toma de decisiones en la relación a la prospección y explotación de AS en la región. El análisis de la situación inicial (1981) y la presente (2009), permite evidenciar las modificaciones en la química del agua y su distribución espacial en el interior del área de estudio en el transcurrir del tiempo.

### 5.8.7 Evolución Hidrogeoquímica

Los resultados muestran que la zona oeste del área investigada y en base al diagrama de Tóth (1999) es la que presenta mejor calidad de AS, por lo cual es considerada como zona de

recarga, los tipos de agua predominantes son: Ca-Mg-Na-HCO<sub>3</sub> (1981), Ca-Na- HCO<sub>3</sub> (1994) y Ca-HCO<sub>3</sub> las cuales se mineralizan y cambian su calidad química a: Ca-Na-Mg-Cl-SO<sub>4</sub> en 1981, para 1994 se tiene Ca-SO<sub>4</sub> y finalmente para 2009 se registró Ca-SO<sub>4</sub>-Cl. La distribución de grupos cluster incrementa su distancia de vinculación de menor a mayor de oeste a este, presentándose las mayores distancias en la zona central y noreste, antes de que el AS entre en contacto con la PCP. Esta evolución del AS responde de manera positiva el modelo teórico utilizado para explicar los procesos hidrogeológicos teniendo como agente geológico principal al AS (Figura 5.3). Este hecho se confirma por el comportamiento regional de la CE, la T, el Eh y los contenidos de cloruros y sulfatos (Figuras 5.11-5.28).

## 5.9 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

### 5.9.1 Calidad de agua para consumo humano

Diversas gráficas se han preparado para llevar a cabo la comparación de los parámetros observados en las aguas subterráneas del área de estudio respecto a las normas Organización Mundial de la Salud (WHO, World Health Organization).

Las Tablas 5.12-5.14 presentan los resultados que superan los límites recomendables y los límites máximos, el análisis de los mencionados resultados muestra que la CE en 1981 la muestra IN-18\_1981 tiene el máximo valor con 4900 µS/cm y en 2009 la muestra RD-06\_09 es la que tiene mayor valor con 8240 µS/cm.

**Tabla 5.12** Comparación de las muestras de 1981, con normas WHO

	RECOM.	MÁXIMO	IN-01_81	IN-02_81	IN-03_81	IN-04_81	IN-05_81	IN-06_81	IN-07_81	IN-08_81	IN-09_81
CE (µS/cm)	< 400	< 1250	560.00	700.00	590.00		1240.00	720.00	810.00	550.00	670.00
Na	< 20	< 200			30.40		62.30		20.00		20.90
Mg	< 30						55.40				
Ca	< 100						114.00	102.00	102.00		100.00
Cl	< 25						198.80	35.50	28.40		28.40
SO <sub>4</sub>	< 25	< 250	166.60	206.40	83.00	62.40	350.10	177.10	187.70	41.30	187.70

Continuación Tabla 5.12

	RECOM.	MÁXIMO	IN-10_81	IN-11_81	IN-12_81	IN-13_81	IN-14_81	IN-15_81	IN-16_81	IN-17_81	IN-18_81
CE (µS/cm)	< 400	< 1250	870.00	560.00	920.00	1210.00	580.00	620.00	660.00	560.00	4900.00
Na	< 20	< 200	23.50	29.00	58.40	49.00	23.90	23.90	59.80	41.40	386.90
Mg	< 30				31.70						157.20
Ca	< 100		136.00		101.00	117.00					420.00
Cl	< 25		60.30		95.80	53.20		28.40	31.90	35.50	1164.40
SO <sub>4</sub>	< 25	< 250	250.10	135.40	187.70	187.70		135.40	135.40	124.80	667.70

Continuación Tabla 5.12

	<i>RECOM.</i>	<i>MÁXIMO</i>	<i>IN-19_81</i>	<i>IN-20_81</i>	<i>IN-21_81</i>	<i>IN-22_81</i>	<i>IN-23_81</i>	<i>IN-24_81</i>	<i>IN-25_81</i>
<i>CE</i> ( $\mu\text{S/cm}$ )	< 400	< 1250	720.00	1220.00	460.00	1510.00	830.00	670.00	810.00
<i>Na</i>	< 20	< 200	24.40	34.30	20.00	106.00	32.00	63.50	78.40
<i>Mg</i>	< 30					51.00		30.00	
<i>Ca</i>	< 100		102.00	192.00		119.00	117.00		
<i>Cl</i>	< 25			80.70		131.30	28.40	42.60	28.40
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	145.90	281.30	104.20	354.70	313.00	31.20	104.20

El sodio tiene un valor máximo en 1981 de 386.90 mg/l (IN-18\_81) y en 2009 un valor de 271.64 mg/l. El potasio no supera el límite máximo de la norma en 1981 y en 1994, pero en las muestras de 2009 se registraron 36.77 mg/l en la muestra RD-04\_09. El valor máximo de sodio es de 386.90 mg/l (IN-18\_81) en 1981 y para 2009 se registró un valor máximo de 271.64 mg/l en la muestra RD-06\_09.

Tabla 5.13 Comparación de las muestras de 1994, con normas WHO

	<i>RECOM.</i>	<i>MÁXIMO</i>	<i>SG-01_94</i>	<i>SG-02_94</i>	<i>SG-03_94</i>	<i>SG-04_94</i>	<i>SG-05_94</i>	<i>SG-06_94</i>	<i>SG-07_94</i>	<i>SG-08_94</i>	<i>SG-09_94</i>	<i>SG-10_94</i>
<i>Na</i>	< 20	< 200	39.92			25.80	51.25	34.00	147.00	39.00	57.00	59.00
<i>Ca</i>	< 100		147.00	135.80	137.90	200.20	215.55	245.86		227.34	133.90	120.60
<i>Cl</i>	< 25		62.00	25.40	26.90	40.20	46.44	37.55	105.50	32.65	36.60	
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	141.00	221.80	226.70	298.70	319.09	380.30	236.00	331.73	118.10	79.40
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	50.00			57.60	84.14	66.43	60.40	83.75	106.30	70.90

	<i>RECOM.</i>	<i>MÁXIMO</i>	<i>SG-11_94</i>	<i>SG-12_94</i>	<i>SG-13_94</i>	<i>SG-14_94</i>	<i>SG-15_94</i>	<i>SG-16_94</i>	<i>SG-17_94</i>	<i>SG-18_94</i>	<i>SG-19_94</i>	<i>SG-20_94</i>
<i>Na</i>	< 20	< 200	55.30	47.30	35.50	51.50	86.20	22.70	28.00	22.70	43.50	37.75
<i>Ca</i>	< 100		114.80	104.00	104.00	144.80	156.00	146.80	168.90	168.90	128.83	259.34
<i>Cl</i>	< 25		28.20				42.80		53.90	34.20	36.46	34.83
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	112.40	47.30	42.00	238.30	256.80	32.30	214.00	253.90	158.87	323.91
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	101.90	70.90	77.50	128.40	46.50	232.90	64.21	27.50	38.09	59.79

	<i>RECOM.</i>	<i>MÁXIMO</i>	<i>SD-21_94</i>	<i>SD-22_94</i>	<i>SD-23_94</i>	<i>SD-24_94</i>	<i>SD-25_94</i>	<i>SD-26_94</i>	<i>SD-27_94</i>	<i>SD-28_94</i>	<i>SD-29_94</i>	<i>SD-30_94</i>
<i>Na</i>	< 20	< 200	26.60	28.60	81.00	71.25	66.50	32.50		23.60	53.80	39.90
<i>Ca</i>	< 100		197.60	293.90	147.35	122.93	265.90	183.00	159.30	179.00	106.10	146.50
<i>Cl</i>	< 25		39.50	44.50	63.12	56.90	216.60	62.20	28.90	48.30	32.20	62.00
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	285.60	507.80	125.12	69.97	264.20	243.60	256.80	224.70	122.70	141.00
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	50.90	48.70	95.21	119.57	152.80	59.80		62.00	57.60	50.00

Continuación Tabla 5.13

	<i>RECOM.</i>	<i>MÁXIMO</i>	<i>SD-31_94</i>	<i>SD-32_94</i>	<i>SD-33_94</i>	<i>SD-34_94</i>
<i>Na</i>	< 20	< 200		82.00	43.50	65.00
<i>Ca</i>	< 100		115.80	225.70	120.40	128.00
<i>Cl</i>	< 25			106.10		29.40
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	72.40	183.60	103.70	140.40
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	46.90	95.20	79.70	51.00

Con relación al magnesio se reportaron valores máximos iguales a 157.20 y 375.26 mg/l en las muestras IN-18\_81 (1981) y RD-04-09 (2009) respectivamente. El calcio tiene valores elevados, en el caso del año 1981 se registró un valor 420 mg/l (IN-18\_81), para 1994 se tenía un valor de 293.90 mg/l (SG-22\_94), para el año 2009 la muestra RD-06\_09 tiene un valor de 542.76 mg/l.

Los aniones que superan los límites máximos son cloruros, nitratos y sulfatos. Los cloruros medidos en 1981 tienen su máximo valor en la muestra IN-18\_81 con 1164.40 mg/l, la muestra SG-25\_94 es la que tiene el valor máximo en el año 1994 con un valor igual a 216.60 mg/l, finalmente el mayor valor para 2009 es igual 708.23 mg/l en la muestra RD-06\_09. Los nitratos superan los valores máximos permitidos por norma en los años 1994 y 2009, 232.90 mg/l y 1,287.82 mg/l se midieron en las muestras SG-19\_94 y RD-06\_09 respectivamente. Los valores máximos de sulfato superan los permitidos por la norma en las tres gestiones en análisis. En 1981 la muestra IN-18\_81 registra un máximo valor de 687.70 mg/l, para 1994 se reporta 507.80 mg/l en la muestra SG-22\_94 y para 2009 la muestra RD-12\_09 presentó un valor máximo de 351.34 mg/l.

**Tabla 5.14** Comparación de las muestras de 2009, con normas WHO

	RECOM.	MÁXIMO	RD-01_09	RD-02_09	RD-03_09	RD-04_09	RD-05_09	RD-06_09	RD-07_09	RD-08_09
<i>T</i> (°C)	< 12	< 25	21.70	22.50	23.50	22.80	22.90	21.90	23.70	19.70
<i>CE</i> (μS/cm)	< 400	< 1250	1603.00	1105.00	968.00	2790.00	1954.00	8240.00	1002.00	482.00
<i>TDS</i>		< 1500				2187.40		6817.20		
<i>Na</i>	< 20	< 200	103.32	41.86	27.46	176.03	126.87	271.64	67.30	
<i>NH<sub>4</sub></i>	< .5		6.33	0.83	0.68	3.71	2.13	7.22	1.26	
<i>K</i>	< 10	< 12	23.18			36.77		17.15		
<i>Mg</i>	< 30					375.26	30.28	143.85		
<i>Ca</i>	< 100		225.70	157.77	181.49	521.08	270.90	542.76	149.74	
<i>Cl</i>	< 25		216.81	135.22	240.16	73.24	128.63	708.23	64.13	
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	53.25	343.16		307.68	170.47	1287.82	28.12	
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	165.30				349.71	201.42	94.88	

Continuación Tabla 5.14

	RECOM.	MÁXIMO	RD-09_09	RD-10_09	RD-11_09	RD-12_09	RD-13_09	RD-14_09	RD-15_09	RD-16_09
<i>T</i> (°C)	< 12	< 25	25.3	20.10	21.50	21.60	22.40	20.30	23.30	25.30
<i>CE</i> (μS/cm)	< 400	< 1250	1188	763.00	542.00	1163.00	932.00	474.00	658.00	1194.00
<i>TDS</i>		< 1500								
<i>Na</i>	< 20	< 200	43.55			41.67	32.44			49.78
<i>NH<sub>4</sub></i>	< .5		0.703	0.61		0.71	0.62			0.87
<i>K</i>	< 10	< 12								
<i>Mg</i>	< 30									
<i>Ca</i>	< 100		208.42	131.21		192.45	148.75		125.34	201.10
<i>Cl</i>	< 25		80.35			54.68	44.40			57.73
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	33.68							40.49
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	267.38	163.91	40.12	351.34	180.25	26.15	26.72	169.72

Continuación Tabla 5.14

	RECOM.	MÁXIMO	RD-17_09	RD-18_09	RD-19_09	RD-20_09	RD-21_09	RD-22_09	RD-23_09
<i>T</i> (°C)	< 12	< 25	23.00	25.10	25.30	20.60	25.40	24.20	25.80
<i>CE</i> (mS/cm)	< 400	< 1250	1540.00	1052.00	1256.00	1150.00	836.00	859.00	964.00
<i>TDS</i>		< 1500							
<i>Na</i>	< 20	< 200	75.90	43.37	93.00	32.37	22.31	22.36	24.56
<i>NH<sub>4</sub></i>	< .5		1.56	0.68	1.75	0.78			
<i>K</i>	< 10	< 12							
<i>Mg</i>	< 30								
<i>Ca</i>	< 100		243.60	209.59	159.97	221.24	159.53	145.72	189.82
<i>Cl</i>	< 25		157.60	54.32	89.05	26.77			
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	< 50	61.84	30.82	50.27				
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	< 250	171.57	345.21	65.73	249.39	183.16	167.06	215.16

Las Tablas 5.15 a 5.17, detallan los porcentajes de muestras de AS que exceden los valores recomendados por norma de calidad del agua potable.

Tabla 5.15 Incumplimiento porcentual de la norma WHO en 1981

Parámetro	Recomendado	Muestras que exceden valor norma/Total muestras	Porcentaje (%)
<i>CE</i> (μS/cm)	< 400	24/25	96.00
<i>Na</i> (mg/l)	< 20	20/25	80.00
<i>Mg</i> (mg/l)	< 30	5/25	20.00
<i>Ca</i> (mg/l)	< 100	12/25	48.00
<i>Cl</i> (mg/l)	< 25	16/25	64.00
<i>SO<sub>4</sub></i> (mg/l)	< 25	24/25	96.00

Tabla 5.16 Incumplimiento porcentual de la norma WHO en 1994

Parámetro	Recomendado	Muestras que exceden valor norma/Total muestras	Porcentaje (%)
<i>Na</i> (mg/l)	< 20	30/34	88.23
<i>Ca</i> (mg/l)	< 100	33/34	97.00
<i>Cl</i> (mg/l)	< 25	28/34	82.35
<i>SO<sub>4</sub></i> (mg/l)	< 25	34/34	100.00
<i>NO<sub>3</sub></i> (mg/l)	< 25	31/34	91.18

Tabla 5.17 Incumplimiento porcentual de la norma WHO en 2009

Parámetro	Recomendado	Muestras que exceden valor norma/Total muestras	Porcentaje (%)
<i>T</i> (°C)	< 12	23/23	100.00
<i>CE</i> (mS/cm)	< 400	23/23	100.00
<i>TDS</i>		2/23	8.70
<i>Na</i>	< 20	18/23	78.26
<i>NH<sub>4</sub></i>	< .5	15/23	65.22
<i>K</i>	< 10	3/23	13.04
<i>Mg</i>	< 30	3/23	13.04
<i>Ca</i>	< 100	20/23	86.95
<i>Cl</i>	< 25	15/23	65.22
<i>NO<sub>3</sub></i>	< 25	11/23	47.83
<i>SO<sub>4</sub></i>	< 25	20/23	86.95

Como se determinó en las Tablas 5.15, 5.16 y 5.17 el número de parámetros que exceden considerablemente las normas de calidad de agua potable son 6,5 y 11 respectivamente, hecho que demuestra una evolución negativa en el transcurso de 28 años.

Se realizó el análisis para la determinación de metales pesados en 13 muestras del año 2008, los resultados reportados por el laboratorio comercial ACTLABS (Ancaster, Ontario, Canadá) medidos con el método ICP-MS reportan que se encontró bromo con valores mayores al límite máximo de la norma (0.10 mg/l; WHO, 2008) en 7 muestras, siendo 3.81 mg/L el mayor valor medido en la muestra de AS del Ejido La Escondida. El manganeso está presente en una sola muestra con un valor igual a 1.12 mg/l (valor máximo en la norma igual a 0.4 mg/L) en la muestra de la colonia Camacho. Los demás metales pesados se encuentran en concentraciones por debajo de las directrices de la Norma para Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud.

### 5.9.2 Calidad de agua para actividades agrícolas

Debido a que la principal actividad socio-económica de los municipios de Linares y Hualahuises es la agricultura, es necesario conocer la aptitud del AS destinada al riego. Para llevar a cabo el riego, es necesario evaluar los posibles problemas de salinidad y principalmente altos contenidos de Na<sup>+</sup>, lo que dificulta el desarrollo de los cultivos o la labranza (Garza-Tamez, 2009).

Se realizó la estimación de la relación de absorción de sodio o índice SAR para las muestras colectadas aplicando la ecuación siguiente:

$$SAR = \frac{Na}{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{1/2}} \quad (5.4)$$

Las Tablas 5.18 a 5.20 presentan los valores calculados para las gestiones 1981, 1994 y 2009 respectivamente. La Figura 5.29 muestra la variación del SAR en función a la Conductividad Eléctrica (μhos/cm). Existen diversas clasificaciones de aguas naturales para uso agrícola basadas en el SAR y la conductividad eléctrica. Una alta concentración de sodio puede afectar la permeabilidad de los suelos, incrementa su erosión, puede causar problemas de infiltración y repercute en el crecimiento de las plantas, la Australian Water Quality Guidelines (2000) reporta la siguiente escala; a) SAR <3, aguas para las cuales no existe restricción de uso, b) SAR= 3-6, agua utilizable a cultivos sensitivos con ciertos cuidados; c) SAR= 6-9, agua aplicable a cultivos no sensitivos; d) SAR >9, agua que puede provocar daños severos en cultivos.

En cuanto a la conductividad eléctrica, United States Salinity Laboratory Staff (1969) reportó la siguiente escala: a) CE <750 mmhos/cm, agua para la que no se reportan efectos dañinos; b) CE= 750–1500 mmhos/cm, agua que puede tener efectos dañinos sobre cultivos sensitivos; c) CE = 1500–3000 mmhos/cm, agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y requiere de un manejo cuidadoso; d) CE >3000 mmhos/cm, aguas que pueden ser utilizadas únicamente en riego de plantas tolerantes en suelo permeables, considerando un manejo cuidadoso.

**Tabla 5.18** Calidad de Agua para Riego (muestras 1981)

	<i>IN-01_81</i>	<i>IN-02_81</i>	<i>IN-03_81</i>	<i>IN-04_81</i>	<i>IN-05_81</i>	<i>IN-06_81</i>	<i>IN-07_81</i>	<i>IN-08_81</i>	<i>IN-09_81</i>
<i>Conductividad Eléctrica <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math></i>	560	700	590	380	1240	720	810	550	670
<i>Categoría</i>	C2	C2	C2	C2	C3	C2	C3	C2	C2
<i>Salinidad</i>	Media	Media	Media	Media	Alta	Media	Alta	Media	Media
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	0.46	0.43	0.84	0.6	1.2	0.48	0.48	0.55	0.52
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.14	0.12	0.27	0.23	0.26	0.14	0.14	0.18	0.15
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>	16.22	21.88	27.54	47.12	44.48	18.13	20.95	21.33	19.72

	<i>IN-10_81</i>	<i>IN-11_81</i>	<i>IN-12_81</i>	<i>IN-13_81</i>	<i>IN-14_81</i>	<i>IN-15_81</i>	<i>IN-16_81</i>	<i>IN-17_81</i>	<i>IN-18_81</i>
<i>Conductividad Eléctrica <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math></i>	870	560	920	1210	580	620	660	560	4900
<i>Categoría</i>	C3	C2	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C4
<i>Salinidad</i>	Alta	Media	Alta	Alta	Media	Media	Media	Media	Muy Alta
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	0.5	0.77	1.3	1.06	0.78	0.63	1.7	1.3	4.09
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.12	0.23	0.33	0.26	0.29	0.19	0.56	0.47	0.5
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>	19.98	28.11	34.1	27.93	44.31	35.92	33.8	37.14	38.16

	<i>IN-19_81</i>	<i>IN-20_81</i>	<i>IN-21_81</i>	<i>IN-22_81</i>	<i>IN-23_81</i>	<i>IN-24_81</i>	<i>IN-25_81</i>
<i>Conductividad Eléctrica <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math></i>	720	1220	460	1510	830	670	810
<i>Categoría</i>	C2	C3	C2	C3	C3	C2	C3
<i>Salinidad</i>	Media	Alta	Media	Alta	Alta	Media	Alta
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	0.57	0.63	0.63	2.05	0.7	1.8	2.22
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.15	0.13	0.23	0.45	0.17	0.59	0.72
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>	26.32	13.77	29.03	41.4	26.74	52.36	34.49

**Tabla 5.19** Calidad de Agua para Riego (muestras 1994)

	<i>SD-01_94</i>	<i>SD-02_94</i>	<i>SD-03_94</i>	<i>SD-04_94</i>	<i>SD-05_94</i>	<i>SD-06_94</i>	<i>SD-07_94</i>	<i>SD-08_94</i>	<i>SD-09_94</i>
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	0.84		0.42	0.48	0.93	0.58	0.42	0.7	1.41
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.2		0.11	0.1	0.19	0.11	0.1	0.14	0.39
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>	13.82	8.85	8.43	8.1	6.76	6.76	9.45	3.24	8.96

## Continuación 5.19

	<i>SD-10_94</i>	<i>SD-11_94</i>	<i>SD-12_94</i>	<i>SD-13_94</i>	<i>SD-14_94</i>	<i>SD-15_94</i>	<i>SD-16_94</i>	<i>SD-17_94</i>	<i>SD-18_94</i>
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	1.41	1.36	1.21	0.9	1.09	1.81	0.49	0.56	0.46
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.39	0.38	0.36	0.26	0.26	0.44	0.12	0.13	0.11
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>	8.96	9.02	9.73	11.63	15.17	8.95	8.34	9.86	8.32

	<i>SD-19_94</i>	<i>SD-20_94</i>	<i>SD-21_94</i>	<i>SD-22_94</i>	<i>SD-23_94</i>	<i>SD-24_94</i>	<i>SD-25_94</i>	<i>SD-26_94</i>	<i>SD-27_94</i>
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	1.06	0.64	0.5	0.44	1.73	1.53	1.04	0.62	
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.29	0.13	0.11	0.08	0.43	0.38	0.19	0.14	
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>		0.84	7.84	8.24	11.23	25.23	14.43	11.06	6.03

	<i>SD-28_94</i>	<i>SD-29_94</i>	<i>SD-30_94</i>	<i>SD-31_94</i>	<i>SD-32_94</i>	<i>SD-33_94</i>	<i>SD-34_94</i>
<i>Relación de Adsorción de Sodio (SAR)</i>	0.46	1.31	0.84	0.37	1.42	1.06	1.54
<i>Relación de Intercambio de Sodio (ESR)</i>	0.1	0.36	0.2	0.1	0.28	0.3	0.42
<i>Riesgo de Magnesio (MH)</i>	9.12	17.45	13.86	15.82	11.05	6.29	5.48

Tabla 5.20 Calidad de Agua para Riego (muestras 2009)

	<i>RD-01_09</i>	<i>RD-02_09</i>	<i>RD-03_09</i>	<i>RD-04_09</i>	<i>RD-05_09</i>	<i>RD-06_09</i>	<i>RD-07_09</i>	<i>RD-08_09</i>
Conductividad Eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	1603.00	1105.00	968.00	2790.00	1954.00	8240.00	1002.00	482.00
Categoría	C3	C3	C3	C4	C3	C4	C3	C2
Salinidad	Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Media
Relación de Adsorción de Sodio (SAR)	1.74	0.83	0.54	2.32	1.95	2.68	1.41	0.36
Relación de Intercambio de Sodio (ESR)	0.34	0.19	0.12	0.35	0.34	0.30	0.34	0.12
Riesgo de Magnesio (MH)	15.17	18.02	8.06	13.91	15.56	30.41	13.57	12.60

	<i>RD-09_09</i>	<i>RD-10_09</i>	<i>RD-11_09</i>	<i>RD-12_09</i>	<i>RD-13_09</i>	<i>RD-14_09</i>	<i>RD-15_09</i>	<i>RD-16_09</i>
Conductividad Eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	1188.00	763.00	542.00	1163.00	932.00	474.00	658.00	1194.00
Categoría	C3	C3	C2	C3	C3	C2	C2	C3
Salinidad	Alta	Alta	Media	Alta	Alta	Media	Media	Alta
Relación de Adsorción de Sodio (SAR)	0.79	0.44	0.54	0.77	0.68	0.22	0.34	0.92
Relación de Intercambio de Sodio (ESR)	0.16	0.12	0.17	0.16	0.16	0.07	0.09	0.20
Riesgo de Magnesio (MH)	9.53	8.76	10.90	14.40	13.37	9.90	8.02	8.75

	<i>RD-17_09</i>	<i>RD-18_09</i>	<i>RD-19_09</i>	<i>RD-20_09</i>	<i>RD-21_09</i>	<i>RD-22_09</i>	<i>RD-23_09</i>
Conductividad Eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	1540.00	1052.00	1256.00	1150.00	836.00	859.00	964.00
Categoría	C3						
Salinidad	Alta						
Relación de Adsorción de Sodio (SAR)	1.24	0.77	1.82	0.57	0.47	0.49	0.47
Relación de Intercambio de Sodio (ESR)	0.23	0.16	0.41	0.11	0.11	0.12	0.10
Riesgo de Magnesio (MH)	13.77	12.03	19.46	10.12	8.08	8.76	7.75

Las Tablas 5.18, 5.19 y 5.20 muestran el resumen de los parámetros evaluados para determinar la calidad del AS destinadas al riego. La Figura 5.29 muestra la clasificación de las muestras para los

años 1981 y 2009 en el diagrama SAR tomando como punto de referencia la ciudad de Linares, presentando los valores agua arriba y aguas abajo.

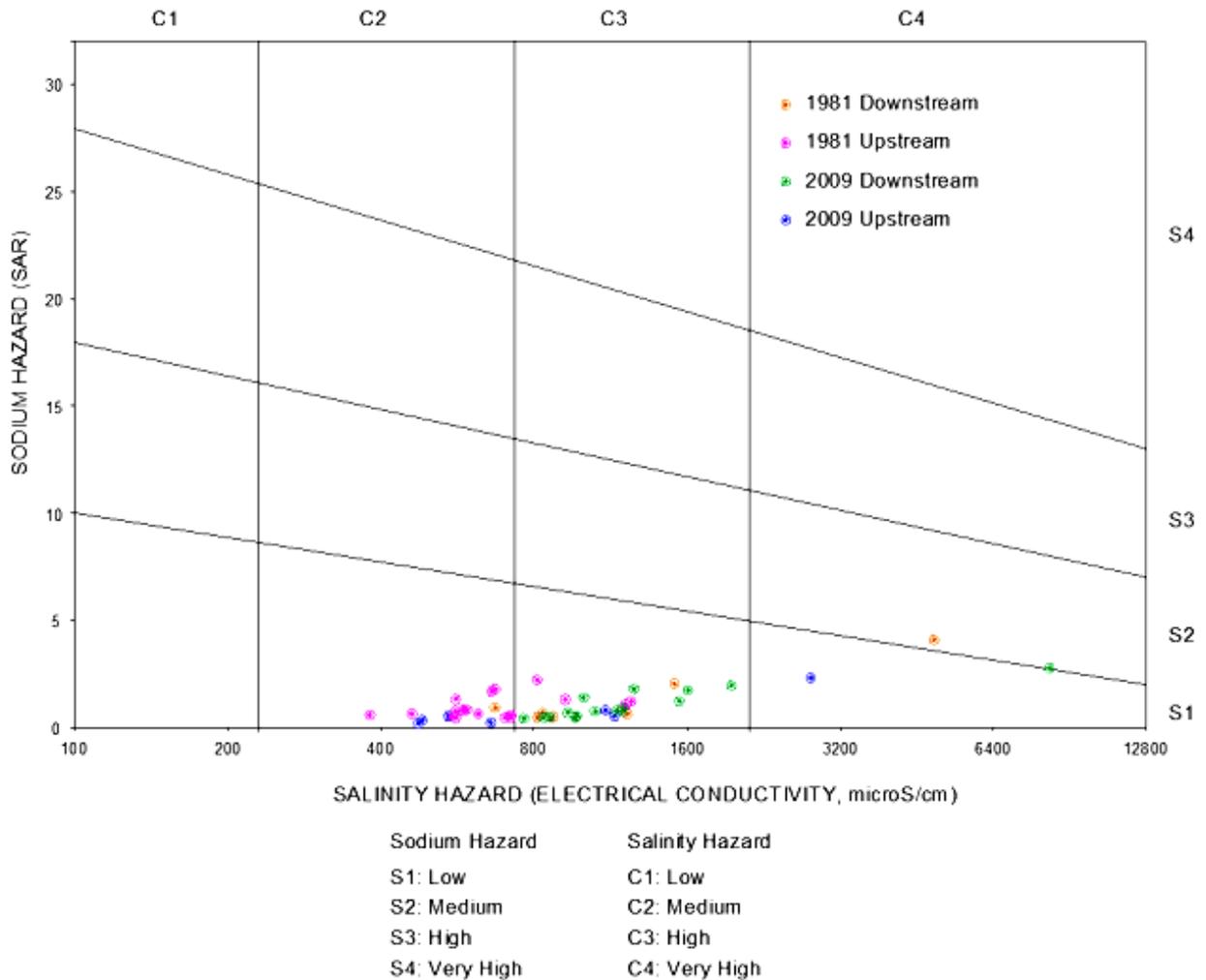


Figura 5.29 Distribución del índice SAR en el área de estudio

## 5.10 CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación geológica y de las características hidrológicas e hidrogeológicas de la CRRP, se determinaron dos unidades hidroestratigráficas: un acuífero de fracturas identificado por las *Formaciones Geológicas Méndez y San Felipe*; y un acuífero de poros, compuesto de los sedimentos aluviales (conglomerados) medianamente consolidado que sobreyace discordantemente en algunas zonas al acuífero fracturado.

El régimen de flujo y sus principales características como la temperatura, la conductividad eléctrica y cloruros coinciden con los modelos teóricos propuestos por Tóth (1999), donde existen evidencias de flujo local e intermedio. La determinación de la recarga fue calculada a partir del

registro mensual de la precipitación de una serie de datos de 25 años, se utilizó el método de Turc y los polígonos de Thiessen para conocer la distribución de los valores de recarga al acuífero.

Los niveles freáticos están directamente relacionados con los procesos de explotación de AS a lo largo del tiempo, de manera general, los niveles freáticos oscilan entre ~2.5 a ~22 m, dependiendo de la zona y de las actividades desarrolladas en la superficie. A pesar de esta variabilidad de la superficie freática, las direcciones principales de flujo son de SW a NE, viéndose localmente afectadas en las zonas donde existe concentración poblacional (región de Linares).

Se realizó una comparación sobre la base del análisis de los diagramas de Piper para los años 1981, 1994 y 2009. Dichos diagramas fueron optimizados con la propuesta de clasificación gráfica de aguas potables propuesta por Davis y De Wiest (1971). Como resultado de este trabajo se determinó que en promedio un 67.33 % de las muestras en 1981 no tenía las características de agua potable, bajo el mismo análisis para 1994 el promedio es igual a 91.75% de agua que no es potable, finalmente en la situación actual (2009) un promedio de 60.47% no es agua potable, estos resultados son producto de la comparación de cada parámetro de cada muestra con las normas.

La hidroquímica de los acuíferos fue comparada entre la situación inicial (1981) y la situación actual (2009) con el objetivo de conocer la evolución hidroquímica durante un periodo de tiempo adecuado para determinar modificaciones en el sistema.

El análisis estadístico multivariado aplicado a los resultados de los análisis de laboratorio del AS permitió identificar grupos (clusters) en la calidad del AS sobre la base de la distancia euclidiana como distancia de vinculación, como resultado, se evidenció que la situación inicial (1981) tenía predominancia del grupo I, con un solo punto de calidad tipo V (Figura 5.25); la situación para el año 2009 es muy diferente, donde la cobertura del grupo I se ve reducida considerablemente, los grupos II, III, IV y V ahora cubren mayor área en la zona central, denotando una evolución de estos grupos de oriente a poniente al interior del área estudiada. El mayor valor en las distancias euclidianas de clasificación indica una hidroquímica más diversa y heterogénea para la situación del 2009.

El análisis de la calidad del AS con fines de consumo humano determinó que varios parámetros exceden los límites recomendados y máximos estipulados por las normas de calidad. La calidad del AS destinada al sector agrícola también fue comparada, evidenciándose que esta es apta para el desarrollo de cultivos, esta se presume que sea la razón para la expansión de las plantaciones cítricas al interior del área de estudio.

## 6. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y ÁREAS DE RIESGO A LA CONTAMINACIÓN

### 6.1 INTRODUCCIÓN

La gestión preventiva de los recursos de agua subterránea y su protección contra la contaminación es uno de los principales retos de nuestra sociedad. Especialmente en los países en desarrollo, donde el umbral del crecimiento poblacional crea expansión de las zonas urbanas y la necesidad de intensificar la agricultura con el objeto de satisfacer las necesidades de la creciente población conducen a un elevado riesgo de contaminación.

Sin embargo, la liberación de los contaminantes debido a actividades humanas no necesariamente tiene como consecuencia la contaminación de las aguas subterráneas, pero si se debe considerar el riesgo potencial del ingreso de los contaminantes al medio acuífero. Para realizar el análisis de este proceso, el concepto de vulnerabilidad se introdujo en los años 60's (Margat, 1968). A partir de entonces varios modelos fueron desarrollados para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos de una manera estandarizada, como por ejemplo DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), GOD (Foster, 1987), AVI (Van Stempvroot *et al.*, 1992) y SINTACS (Civita, 1994).

Estos modelos, consideran parámetros morfológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, geológicos y tipos de suelo para identificar las diferencias en la vulnerabilidad acuífera. Recientemente, estos modelos fueron acoplados a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de generar mapas temáticos de vulnerabilidad que pueden ser utilizados para la planificación del desarrollo territorial, la acción preventiva o la determinación de las fuentes de contaminación en formato digital (Jamrah *et al.*, 2007; Panagopoulos *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007).

Especialmente el método DRASTIC, desarrollado originalmente en los EE.UU. por la Agencia de Protección Ambiental (USEPA), se aplicó en numerosos estudios y con diversos arreglos hidrogeológicos dependido del caso en estudio (Ahmed, 2009b; Al-Zabet, 2002; Aller *et al.*, 1987; Cameron y Peloso, 2001; Jamrah *et al.*, 2007; Kim y Hamm, 1999; Melloul y Collin, 1998; Merchant, 1994).

De manera general, el método DRASTIC posee ventajas y desventajas en su aplicación. Las cualidades que tiene el método son:

- a. Es de fácil aplicación en extensas regiones, debido a que requiere pocos datos y su fácil acceso, que tienen un bajo costo de aplicación (Aller *et al.*, 1987).
- b. La interrelación de muchos parámetros disminuye la probabilidad de dejar a un lado algunos factores importantes, lo que restringe el efecto de un error accidental en el cálculo del modelo final (Rosen, 1994).
- c. Este método proporciona resultados congruentemente precisos para extensas regiones con un complejo sistema de la estructura geológica y las mediciones de campo específicas no son necesarias (Kalinski *et al.*, 1994; McLay *et al.*, 2001).

En contraste el método DRASTIC presenta las siguientes limitaciones:

- a. La selección de los parámetros está basada en las características del área de captación de la cuenca hidrológica y no sobre la base de procesos físico-químicos (Garrett *et al.*, 1989).
- b. Ciertos parámetros relevantes pueden ser atenuados por parámetros poco relevantes en términos de vulnerabilidad bajo ciertas configuraciones específicas (Merchant, 1994; Vbra y Zaporozec, 1994).
- c. Factores como el tiempo de viaje, la dilución y capacidad de absorción no se incluyen en el análisis. El método supone que un contaminante se depositará en toda el área de estudio con una concentración uniforme y por un largo período de tiempo (varios años), por esta razón una prueba de la precisión del modelo obtenido es muy difícil de llevar a cabo (Rosen, 1994).

Es importante señalar que el uso de mapas temáticos en los países en desarrollo y en América Latina no es de uso generalizado a pesar de su importante necesidad como una herramienta prioritaria para la toma de decisiones en esferas gubernamentales y en la industria privada (Ramos-Leal y Rodríguez-Castillo, 2003).

Finalmente, la determinación del riesgo a la contaminación como producto de las actividades antropogénicas, es importante para lograr una planificación adecuada y alcanzar el desarrollo sostenible de los recursos hídricos en áreas urbanas y su periferia.

## 6.2 MÉTODO DRASTIC

El método DRASTIC propuesto por Aller *et al.* (1986), ha sido el más utilizado para realizar mapas de vulnerabilidad de acuíferos (Aller *et al.*, 1987). La aplicación del método DRASTIC está basada en cuatro premisas fundamentales: a) cualquier contaminante se introduce a través de la superficie del suelo; b) la precipitación es la fuerza impulsora para la movilización de los contaminantes; c) el contaminante tiene la misma movilidad del agua subterránea; y d) el área de estudio debe tener por lo menos un tamaño de 0.4 km<sup>2</sup> (Rosen, 1994).

Para calcular el índice DRASTIC como una medida de la vulnerabilidad de un acuífero, se analizan y ponderan siete parámetros hidrogeológicos considerados por el método, los parámetros que conforman el sistema son: a) “D”-Profundidad del nivel freático; b) “R”-Recarga neta de aguas subterráneas; c) “A”-Tipo del acuífero; d) “S”-Tipo de suelo; e) “T”-Topografía; f) “I”-Impacto en la zona no saturada; y g) “C”-Conductividad hidráulica de la zona saturada (Aller *et al.*, 1987).

La configuración de los siete parámetros hidrogeológicos controla el flujo de agua subterránea, a través de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona y se puede utilizar para evaluar la vulnerabilidad del acuífero. La asignación de índices de impacto de cada parámetro, en base a su importancia relativa dentro del conjunto determina el potencial contaminante hacia el acuífero (Kim y Hamm, 1999; Mao *et al.*, 2006).

Para calcular el Índice de Vulnerabilidad DRASTIC (IVD) se utilizan: a) Una escala de asignación de cada parámetro que va de 1 (potencial de contaminación mínima) a 10 (máximo potencial de contaminación) y b) una escala de ponderación que oscila entre 1 (menor impacto) y 5 (impactos más relevantes). La combinación lineal aditiva de los parámetros con la valoración asignada y afectada por los índices de impacto es utilizada para calcular el IVD:

$$IVD = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (6.1)$$

Donde:

$D_r$  = Valor profundidad nivel freático

$R_r$  = Valor para la recarga al acuífero

$A_r$  = Valor para el medio acuífero

$S_r$  = Valor para el tipo de suelo

$T_r$  = Valor para la pendiente topográfica

$I_r$  = Valor para la zona no saturada

$C_r$  = Valor de conductividad hidráulica

$D_w$  = Índice de impacto de profundidad nivel freático

$R_w$  = Índice de impacto de recarga al acuífero

$A_w$  = Índice de impacto del medio acuífero

$S_w$  = Índice de impacto del tipo de suelo

$T_w$  = Índice de impacto de la pendiente topográfica

$I_w$  = Índice de impacto de la zona no saturada

$C_w$  = Índice de impacto de conductividad hidráulica

Algunas modificaciones al método DRASTIC fueron propuestas, en las cuales se introdujeron parámetros adicionales como el índice de uso de suelo, lineamientos geológicos, el espesor del acuífero y las propiedades de contaminantes específicos (Lee, 2003; Mendoza y Barmen, 2006; Secunda *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2007).

En otro ámbito, el software AHP-DRASTIC (Thirumalaivasan *et al.*, 2003) fue desarrollado para obtener valoraciones e impactos ponderados de los parámetros modificados del modelo DRASTIC. Últimamente, los SIG han sido ampliamente utilizados para analizar la vulnerabilidad de los acuíferos (Jamrah *et al.*, 2007; Panagopoulos *et al.*, 2006), la valoración de parámetros en un SIG tiene la cualidad de combinar capas de datos, un rápido cambio de los parámetros y datos utilizados para crear mapas de vulnerabilidad con mucha versatilidad (Wang *et al.*, 2007).

### 6.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La vulnerabilidad acuífera en el área de estudio fue evaluada aplicando el método DRASTIC, los datos de entrada utilizados para la evaluación en este trabajo fueron obtenidos a partir de diversas fuentes de información, como son: investigaciones anteriores, la Comisión Nacional del Agua (CNA), Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y registro de levantamiento de datos en campañas realizadas en campo.

La Base Digital de Datos (BDD) fue creada en un SIG desarrollado en el software ArcGIS (ESRI, 2010). En total, siete mapas temáticos fueron creados usando la BDD hidrogeológicos, detallando a continuación la metodología empleada:

El rango de cada parámetro se normalizó entre 1 y 10 (Tablas 6.1-6.7). Esta normalización es útil para obtener los valores detallados de cada parámetro en función de las condiciones del sitio sirviendo como base para la evaluación comparativa de las variables que intervienen en el sistema (Grillentine, 2000).

Para asignar rangos de valoración a los parámetros, es necesario un buen conocimiento de la geología y la hidrogeología en el área de investigación, motivo por el cual, el trabajo de campo se realizó entre abril de 2008 y marzo de 2009. El objetivo fue verificar las Formaciones geológicas, las características del suelo, investigar la zona no saturada y realizar la medición de los niveles piezométricos en los puntos de control seleccionados en el área de estudio. Paralelamente, se realizó una recopilación bibliográfica y análisis de literatura anterior, todos los datos colectados se tomaron en cuenta para formar y consolidar la BDD final.

### 6.3.1 "D"-Profundidad del nivel freático

La profundidad del nivel freático con relación a la superficie terrestre influye en la carga contaminante que llega a las aguas subterráneas (Thirumalaivasan *et al.*, 2003). El riesgo de contaminación disminuye con la profundidad, las aguas subterráneas con niveles freáticos más profundos tienen menos posibilidades de ser contaminadas, en comparación a los niveles freáticos poco profundos (Ahmed, 2009b). Se evaluó una serie de 85 puntos de medición de los niveles freáticos del agua subterránea durante el mes de marzo de 2009.

Las profundidades en estos puntos fueron medidos en campo con una sonda eléctrica graduada (Solinst) y fueron posicionados geográficamente con un sistema de posicionamiento global (GPS Garmin Etrex HCx). La Figura 6.1 muestra el mapa de niveles del agua subterránea, que varían desde ~296 hasta ~470 m.s.n.m.

Este mapa es el resultado de la interpolación de los valores de profundidad del agua subterránea aplicando el método Inverse Distance Weight (IDW) herramienta ubicada en el módulo Spatial Analyst en ArcGIS. Como resultado se obtuvo un conjunto de datos en formato *raster* que se reclasificó con los valores asignados según la tabla 6.1, los cuales varían entre 10 (para 2.5 m) y 1 (para > 20 m).

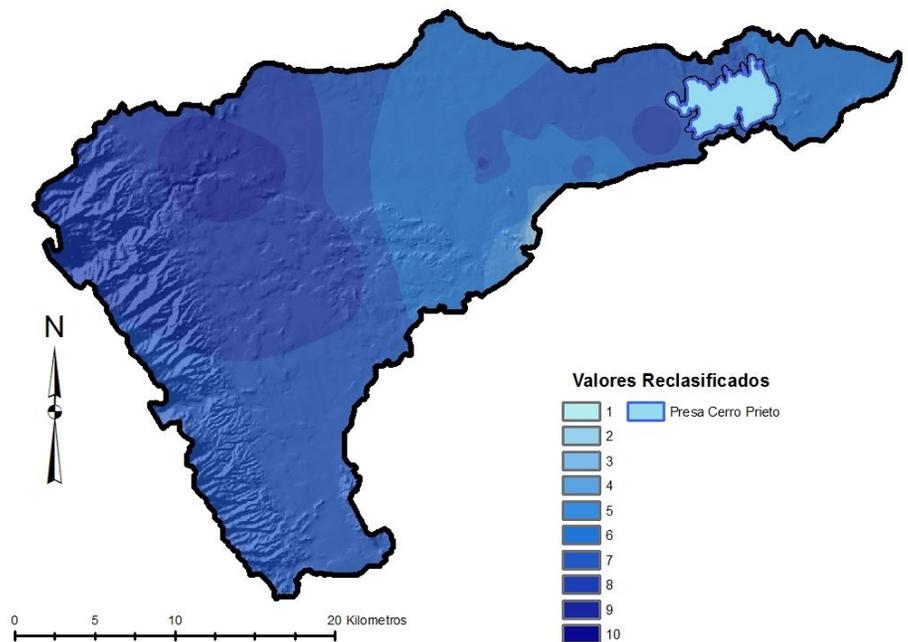


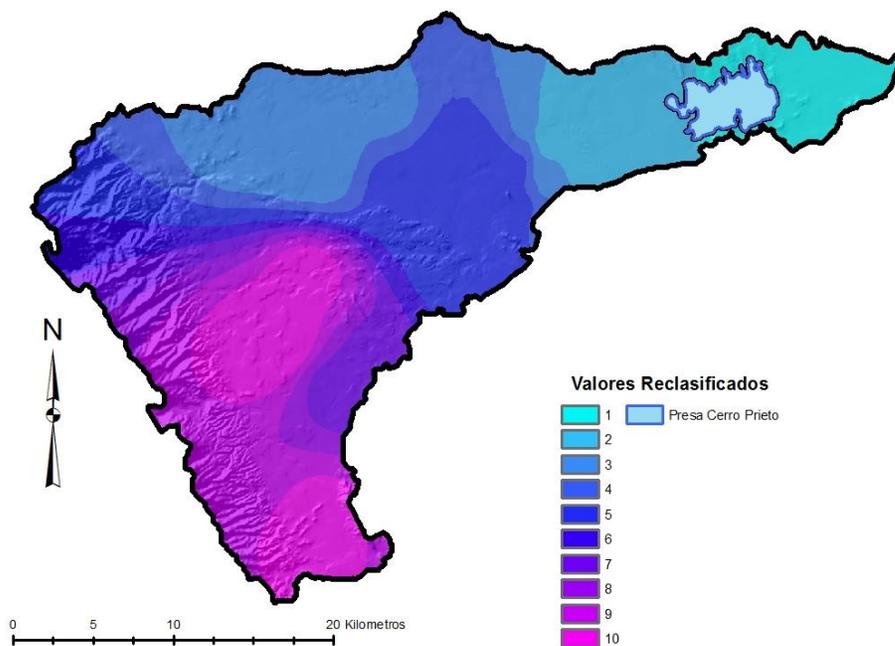
Figura 6.1 Mapa piezométrico según valoración tabla 6.1 (marzo 2009).

Tabla 6.1 Asignación de valores e índices de ponderación para el nivel freático

Parámetro DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice Impacto	Índice total
Profundidad del nivel freático (m)	2.5 a 4.5	10	5	50
	4.5 a 6.5	9	5	45
	6.5 a 8.5	8	5	40
	8.5 a 10.5	7	5	35
	10.5 a 12.5	6	5	30
	12.5 a 14.5	5	5	25
	14.5 a 16.5	4	5	20
	16.5 a 18.5	3	5	15
	18.5 a 20.5	2	5	10
	> 20.5	1	5	5

### 6.3.2 "R"-Recarga neta

La recarga neta es el total de agua que se infiltra desde la superficie del suelo y puede transportar contaminantes hasta la capa freática. Por lo tanto, la recarga neta es un factor muy importante para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero.



Durante el periodo de 1982 a 2007 la CNA midió la precipitación media anual en siete estaciones climatológicas (Las Crucitas, Cerro-Prieto, Camacho, San Francisco, El Popote, La Laja, y Vista Hermosa) al interior del área de estudio, la cual tiene un valor promedio de 1035 mm/año.

Figura 6.2 Recarga del acuífero según valoración tabla 6.2 (marzo 2009).

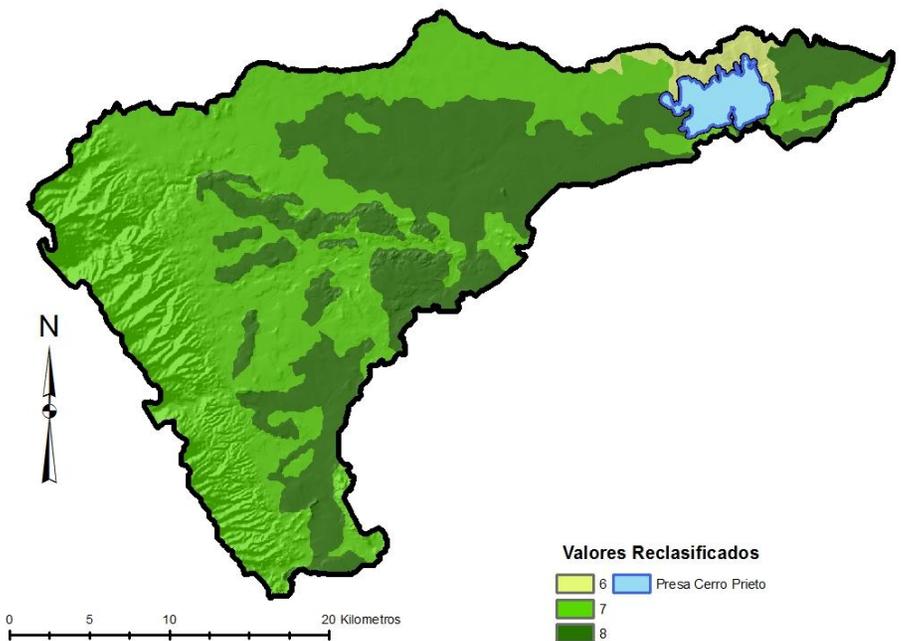
La valoración de la recarga neta se realizó utilizando la fórmula empírica propuesta por Turc (Lerner *et al.*, 1990), misma que varía entre 10 (para 280 mm/año) y 1 (para 115 mm/año), la Tabla 6.2 presenta los valores y la reclasificación asignada a este parámetro, la Figura 6.2 representa la distribución de la recarga en el área.

**Tabla 6.2** Asignación de valores e índices de ponderación para la recarga

Parámetro DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice Impacto	Índice total
Recarga (mm)	115 a 135	1	4	4
	135 a 160	2	4	8
	160 a 175	3	4	12
	175 a 185	4	4	16
	185 a 200	5	4	20
	200 a 215	6	4	24
	215 a 230	7	4	28
	230 a 245	8	4	32
	245 a 260	9	4	36
	260 a 280	10	4	40

### 6.3.3 "A"–Medio Acuífero

El mapa geológico se elaboró en base a investigaciones realizadas por De la Garza, 2000; De León, 1993; Ruiz, 1990 y Ruiz y Werner, 1997. Se revisaron y digitalizaron mapas oficiales del Servicio Geológico Mexicano y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Esta información se integro en el SIG.



**Figura 6.3** Distribución de acuíferos según valoración tabla 6.3 (marzo 2009).

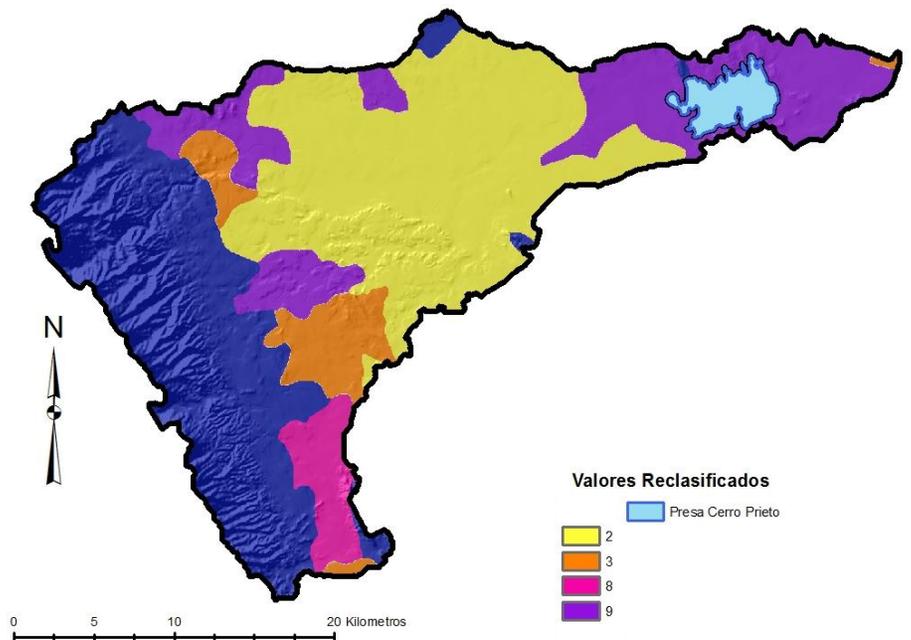
Tres Formaciones geológicas están presentes, sus diferencias litológicas evidencian la existencia de tres sistemas acuíferos principales: a) el acuífero aluvial-conglomerado que es la Formación más vulnerable con respecto a la contaminación a la cual se asignó un valor de 8 (Sedimentos Aluviales y Conglomerados); b) un acuífero de fracturas más profundo, que es menos vulnerable asignándole un valor de 7 (*Formación Méndez*); c) la tercera Formación con litología distinta está ubicada en la frontera norte de la Presa Cerro Prieto (PCP) a la que se le asignó una valoración igual a 6 (*Formación San Felipe*), este mapa se muestra en la Figura 6.3 y los valores de reclasificación se detallan en la Tabla 6.3.

**Tabla 6.3** Asignación de valores e índices de ponderación para el medio acuífero (Aller *et al.*, 1987)

Parámetros DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice Impacto	Índice total
Medio acuífero	Sedimentos aluviales y conglomerado	8	3	24
	Lutita fracturada	7	3	21
	Calizas, lutitas y margas	6	3	18

#### 6.3.4 "S"-Suelos

El mapa de suelos (Figura 6.4) fue tomado de una investigación previa donde se investigan los procesos de erosión Cuenca del Río Pablillo (CHRP), desarrollada por Reyes-Reyna, 2000, esta información fue digitalizada para su uso dentro del SIG. Las valoraciones DRASTIC se determinaron en función de la clasificación del suelo, a cada clase se le asignó un valor particular, 9 para regosoles, 8 para rendzinas, 3 para luvisolos y 2 para Vertisoles (Tabla 6.4).



**Figura 6.4** Suelos del área de estudio según valoración tabla 6.4 (marzo 2009).

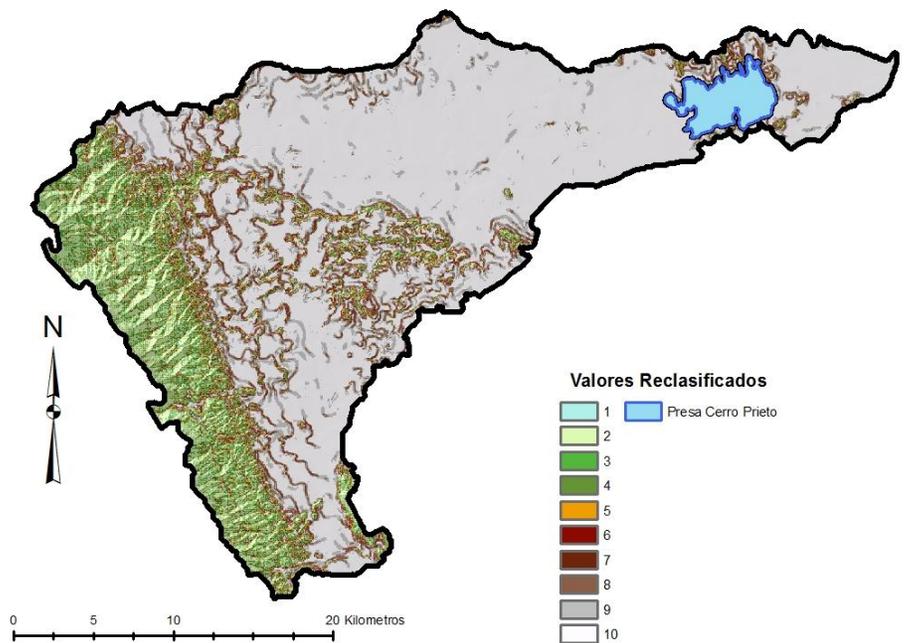
**Tabla 6.4** Asignación de valores e índices de ponderación para el tipo de suelo (Aller *et al.*, 1987)

Parámetros DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice de Impacto	Índice total
Tipo de suelo	Regosol	9	2	18
	Rendzina	8	2	16
	Luvisol	3	2	6
	Vertisol	2	2	4

### 6.3.5 "T"–Pendiente Topografía

La topografía considera la variabilidad de la pendiente de la superficie terrestre. La información topográfica da alguna referencia en la cual los contaminantes se pueden concentrar. Se creó un MDE a partir de la digitalización de dos copias rígidas de mapas topográficos la primera a escala 1:250,000 (INEGI 2006) y la segunda a escala 1:50,000 (INEGI 1999). Esta información fue complementada por puntos en tres dimensiones que se recolectaron con un GPS en la etapa de trabajo de campo. El MDE fue construido usando el

interpolador "Topo a Raster" del modulo *Spatial Analyst* del software ArcGIS. Los diferentes intervalos de pendientes topográficas fueron asignados con una valoración entre 10 (~ 0%) y 1 (> 18%), la distribución de pendientes y su valoración se muestran en la Figura 6.5 y Tabla 6.5.



**Figura 6.5** Relieve topográfico (m.s.n.m.) según valoración tabla 6.5 (marzo 2009).

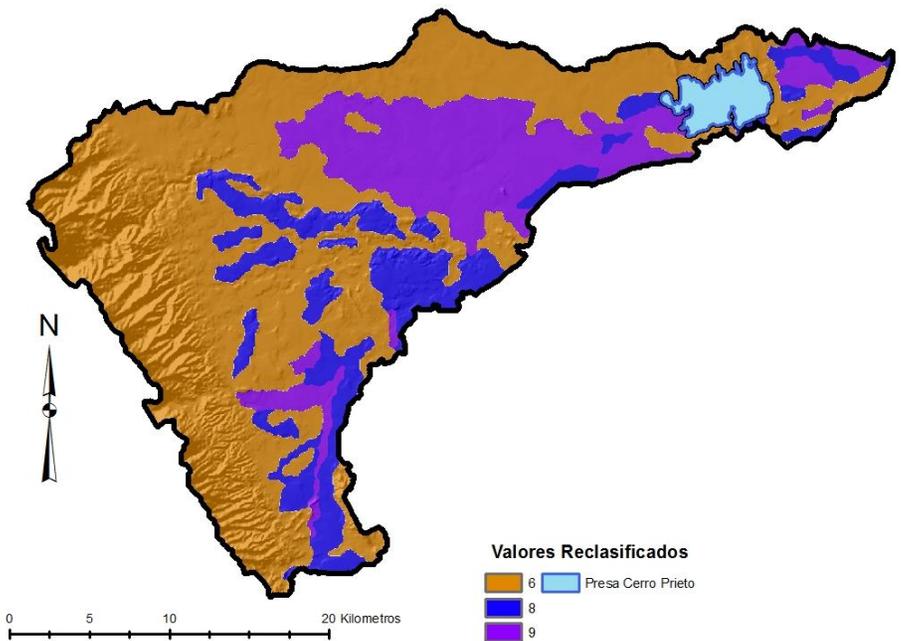
**Tabla 6.5** Asignación de valores e índices de ponderación para la pendiente topográfica

Parámetros DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice de Impacto	Índice total
Pendiente topográfica	0 to 2	10	1	10
	2 to 4	9	1	9
	4 to 6	8	1	8
	6 to 8	7	1	7
	8 to 10	6	1	6
	10 to 12	5	1	5
	12 to 14	4	1	4
	14 to 16	3	1	3
	16 to 18	2	1	2
	>18	1	1	1

### 6.3.6 "I"-Impacto de la zona no saturada

El impacto de la zona no saturada depende del material y la permeabilidad de las capas de la cubierta como los suelos y Formaciones geológicas este parámetro registró arena limosa, arena y grava se observan en las partes central y sur del área de estudio; lutita y arcillas están presentes en los lugares del oeste y el norte. El impacto en la zona no saturada tiene una valoración en el rango de 6 a 9, por la cual el

valor 9 corresponde a la capa la más permeable. La Figura 6.6 muestra el mapa de distribución de la zona no saturada y los valores usados en su reclasificación numérica se muestran en la Tabla 6.6.

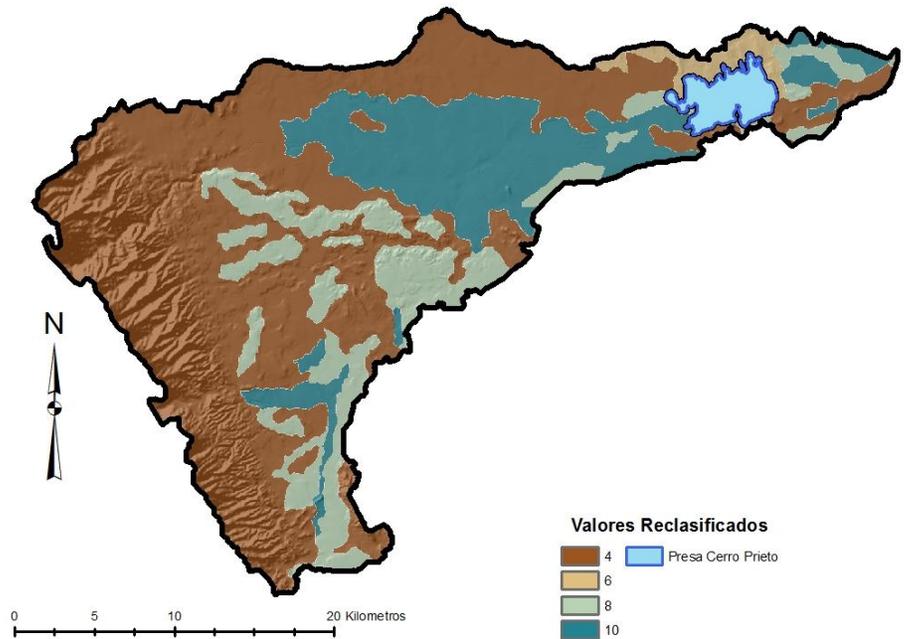
**Figura 6.6** Litología de la zona no saturada según valoración tabla 6.6 (marzo 2009).

**Tabla 6.6** Asignación de valores e índices de ponderación para la zona no saturada (Aller *et al.*, 1987)

Parámetros DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice de Impacto	Índice total
Impacto en la zona no saturada	Lutita fracturada	6	5	24
	Arenisca-margas	6	5	30
	Gravas uniformes	8	5	40
	Aluviones	9	5	45

### 6.3.7 "C"-Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica controla la velocidad de movimiento del agua subterránea en la zona saturada. Este factor indica la capacidad del acuífero para transmitir agua característica que muestra la velocidad de transmisión de agua subterránea en el sistema. Los valores de conductividad hidráulica utilizados en este estudio fueron tomados de la bibliografía (Fetter, 2001). La Figura 6.7 y Tabla 6.7 muestran los datos de este parámetro.



**Figura 6.7** Conductividad hidráulica según valoración tabla 6.7 (marzo 2009).

**Tabla 6.7** Asignación de valores e índices de ponderación para la conductividad hidráulica

Parámetros DRASTIC	Intervalo	Valoración	Índice de Impacto	Índice total
Conductividad hidráulica (m/s)	$1 \times 10^{-1}$ a $1 \times 10^{-3}$	10	3	30
	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-5}$	8	3	24
	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$	6	3	18
	$1 \times 10^{-6}$ a $1 \times 10^{-8}$	4	3	12

Una vez finalizada la base digital de datos de los parámetros individuales en el cálculo del Índice de Vulnerabilidad DRASTIC (IVD), el mapa de vulnerabilidad se construyó aplicando la ecuación del IVD que integra las siete capas de datos hidrogeológicos reclasificados en formato *raster*, esta integración matemática se realizó utilizando el modulo *Raster Calculator*, con lo cual se obtiene in IVD para cada célula al interior del perímetro en análisis.

El método estadístico de clasificación por cuantiles se aplicó para definir cinco categorías, este método distribuye un conjunto de valores en grupos que tienen un número igual de datos. El rango de valores del IVD debe estar entre 30 y 230 puntos, según los resultados de la evaluación la vulnerabilidad en la cuenca se puede clasificar en cinco grupos, es decir, Muy alta Vulnerabilidad - V (161-194); Alta Vulnerabilidad - IV (151-161); Vulnerabilidad Baja - III (143-151), Baja Vulnerabilidad - II (128-143) y Muy Baja Vulnerabilidad - I (87 a 128), que cubren 57.84; 219.80; 207.31 y 156.26 Km<sup>2</sup> de superficie del área de estudio, respectivamente. La Figura 6.8 muestra la distribución de las categorías del IVD obtenidas.

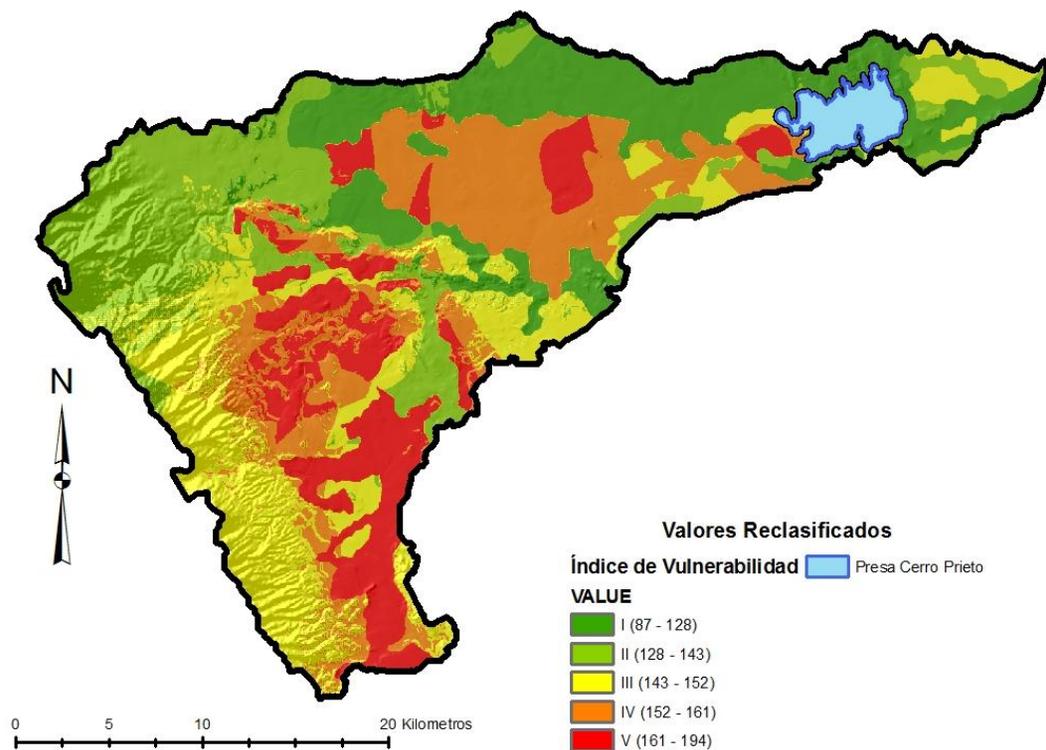


Figura 6.8 Índice de vulnerabilidad DRASTIC – 2009.

#### 6.4 ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA PARA EL AÑO 1981

Las evaluaciones de la vulnerabilidad acuífera implícitamente tienen incluida la variable del tiempo, el parámetro que permite diferenciar a qué fecha pertenece cada mapa de vulnerabilidad

es la Profundidad del Nivel Freático. Se realizó mediciones de campo para la situación actual (año 2009), obteniéndose el mapa presentado en la Figura 6.8.

Los datos más antiguos de piezometría, se registraron por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, datos levantados en campo en el mes de Noviembre de 1981, los cuales permitieron elaborar la Carta Hidrológica de Agua Subterránea Linares-G1411 (INEGI, 1983a). Con el objetivo de determinar la vulnerabilidad acuífera con una visión retrospectiva, se generó un mapa piezométrico del área de estudio (Figura 6.9) sobre la base de datos registrados en 1981 (INEGI, 1983a).

De los siete parámetros considerados por el método DRASTIC, la única variable que sufre un cambio relevante es la Profundidad del Nivel Freático, debido a las extracciones hídricas realizadas en el acuífero a lo largo del tiempo. Los demás parámetros, del método DRASTIC no sufren cambios importantes, por lo cual, hipotéticamente podemos suponer que para periodos de tiempo cortos (menos de un mes), estos parámetros se consideran constantes, siempre y cuando no existan eventos meteorológicos extraordinarios en este lapso.

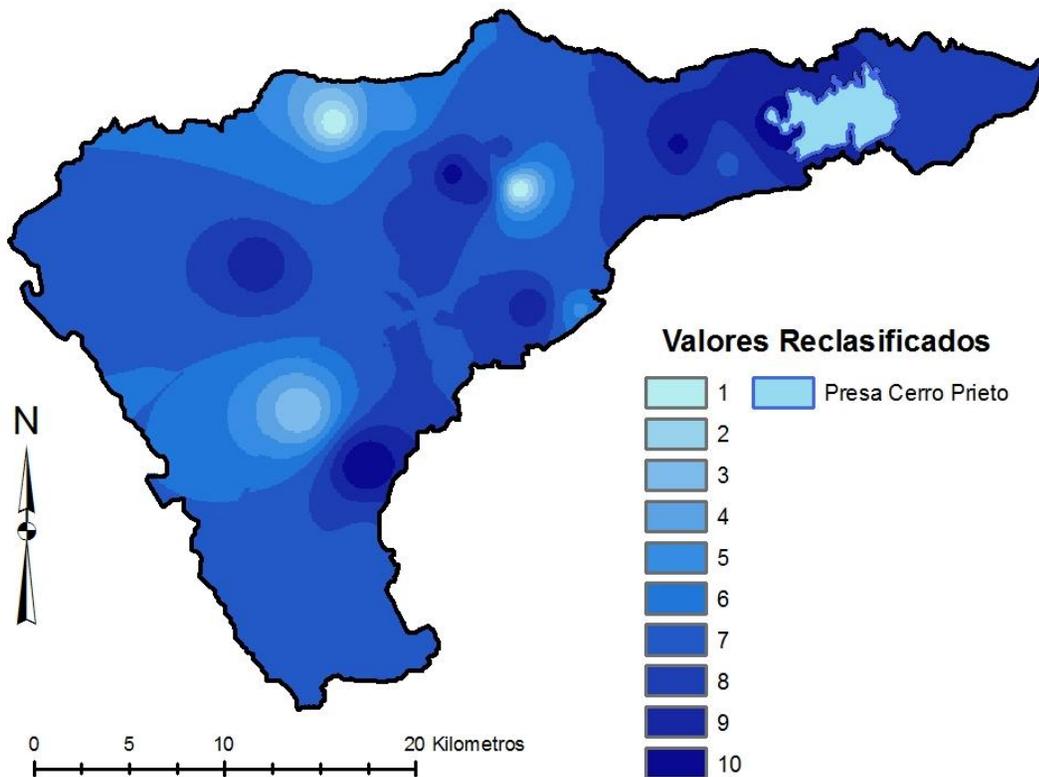


Figura 6.9 Mapa piezométrico (noviembre 1981).

La evaluación de la vulnerabilidad acuífera para 1981, fue posible atendiendo al criterio descrito en el párrafo anterior. Aplicándose el método DRASTIC con los valores piezométricos

correspondientes al año 1981 y manteniendo constantes los valores de los demás parámetros del método.

De esta forma se obtiene el mapa de vulnerabilidad del acuífero para 1981 (Figura 6.10), donde las cinco categorías calculadas son:

- a. Muy Alta Vulnerabilidad - V (167-207)
- b. Alta Vulnerabilidad - IV (159-167)
- c. Vulnerabilidad Media - III (147-159)
- d. Baja Vulnerabilidad - II (136-147)
- e. Muy Baja Vulnerabilidad - I (91 a 136)

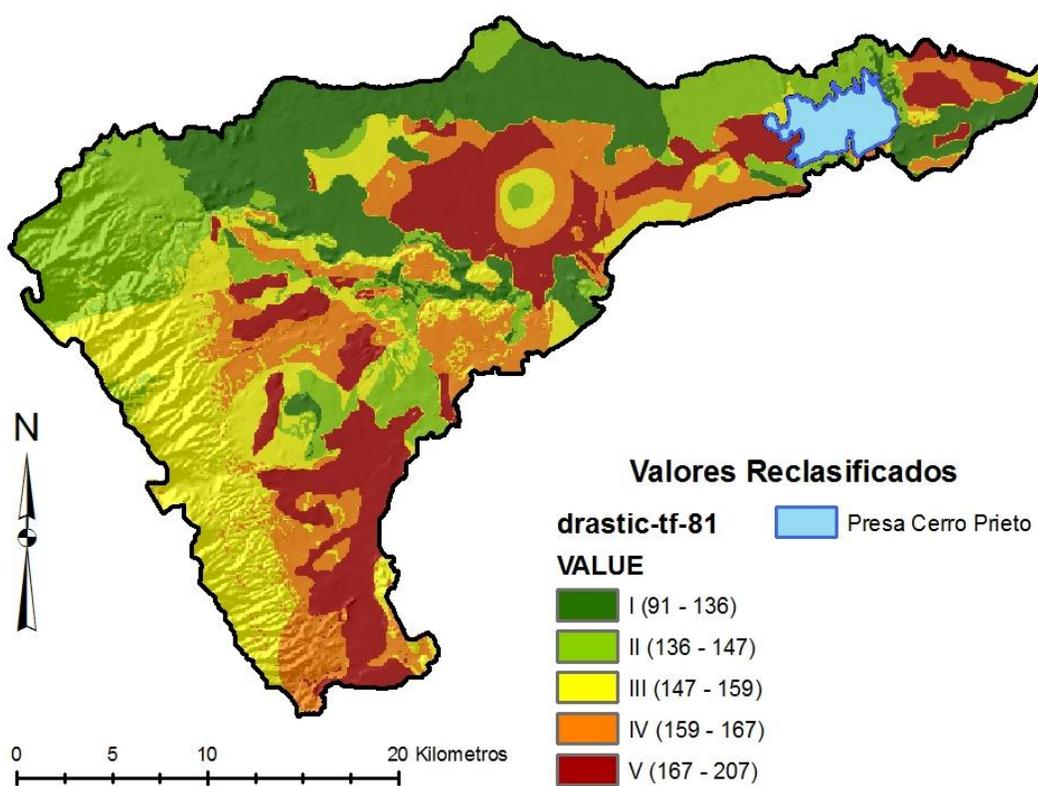


Figura 6.10 Índice de vulnerabilidad DRASTIC – 1981.

## 6.5 VALIDACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA

Las validaciones in-extenso de los mapas de vulnerabilidad generados por el método DRASTIC, son complejas en su elaboración (Rosen, 1994). Un buen indicador de posible contaminación en una determinada área es el nitrato presente en las aguas subterráneas y/o superficiales (Panagopoulos *et al.*, 2006).

Por esta razón, se analizó la distribución de nitratos del año 1981 de 25 muestras de agua subterránea. Los valores de la concentración de nitratos se superpusieron sobre el mapa del Índice de Vulnerabilidad DRASTIC correspondiente al mismo año aplicando técnicas de análisis multicapa en ArcGIS.

Los valores de nitratos del año 1981, se encuentran especificados en la Carta de Aguas Subterráneas publicado en 1983 por el INEGI (INEGI, 1983a), obteniéndose como resultado el mapa de la Figura 6.11.

El procedimiento antes descrito, también se realizó para el año 2009, donde de manera general los valores de nitratos, de 23 muestras de agua subterránea, son mucho mayores a los registrados en 1981, datos que son mostrados en la Figura 6.12.

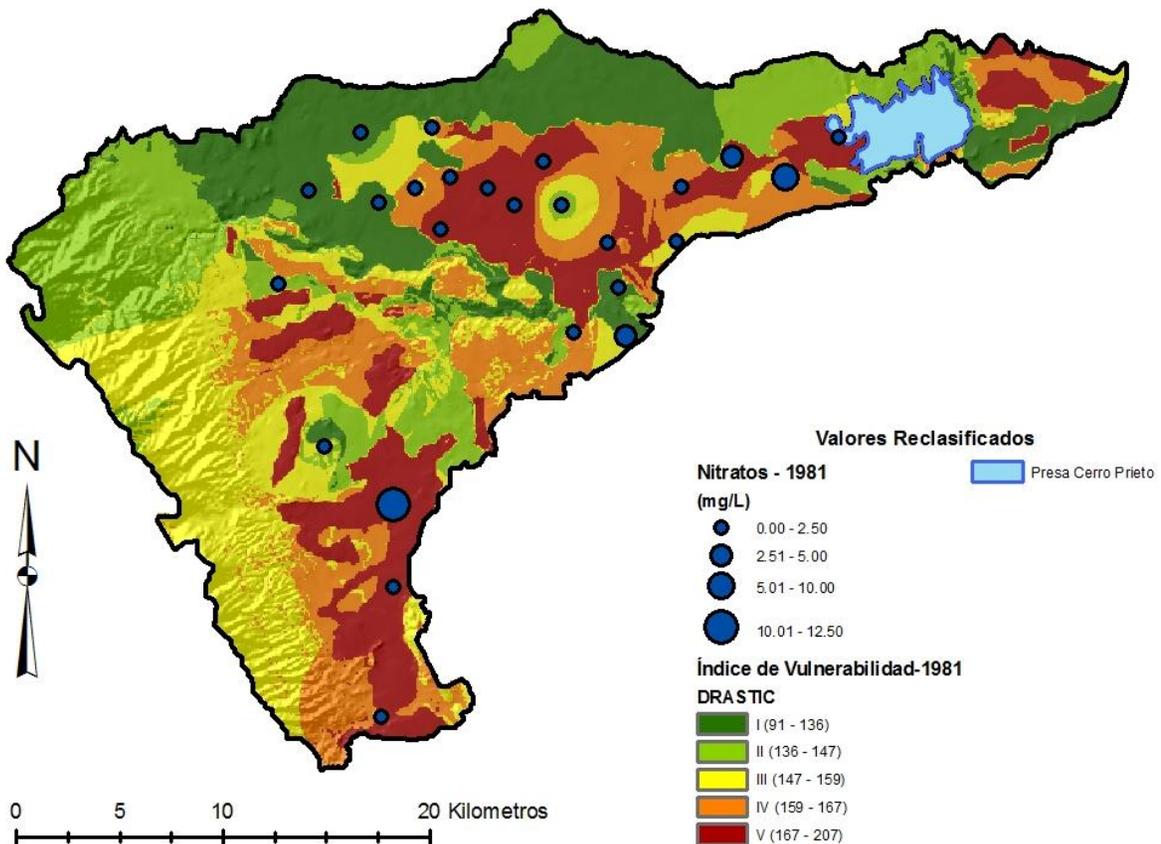


Figura 6.11 Índice de vulnerabilidad DRASTIC-1981 y distribución de nitratos en mg/L.

En resumen, en el año 1981 los valores de nitratos no superaban los 12.50 mg/L. Los mayores valores se presentan hacia el suroeste (zona de recarga) y al noreste (cerca de la PCP) del área, en la parte central se presenta mayor vulnerabilidad acuífera (categorías IV y V), y los contenidos de nitratos son menores.

Por su concentración, se puede inferir que los contenidos de nitratos se deben a fuentes naturales como producto de la mineralización del agua subterránea al atravesar más de 50 km desde la zona de recarga hasta la zona circundante a las ciudades de Linares y Hualahuises.

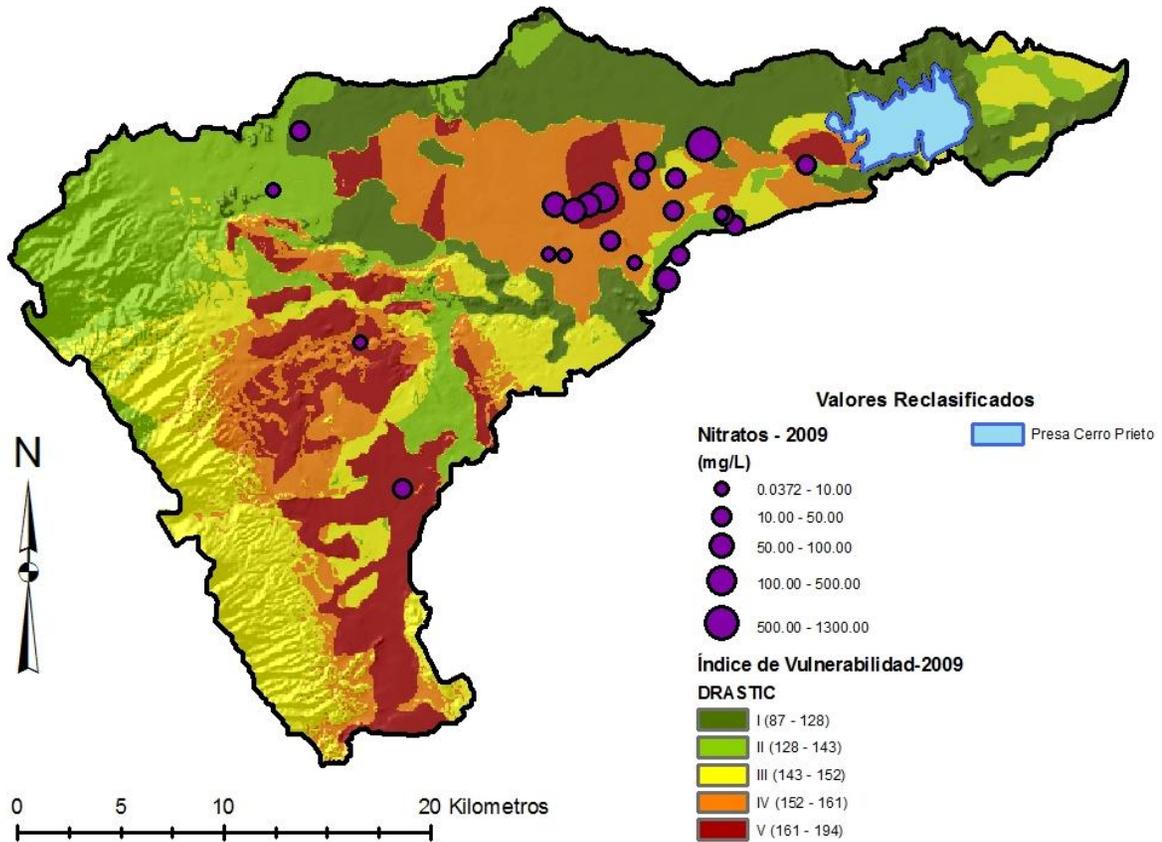


Figura 6.12 Índice de vulnerabilidad DRASTIC-2009 y Distribución de nitratos en mg/L.

La situación para el año 2009 es totalmente distinta, donde los máximos valores de nitratos se registraron en la zona central del área de estudio (entre Linares y Hualahuises), con valores de concentración altos que superan los 1,300 mg/L, zona en donde los índices de vulnerabilidad tienen categorías IV y V la cobertura de la categoría V se ve reducida significativamente en comparación al área cubierta en el año 1981. Tanto la zona de recarga como las áreas próximas a la PCP presentan concentración de nitratos menores a 50 mg/L.

En ambos casos, los máximos valores de contenido de nitratos y la mayoría de puntos muestreados se encuentran dentro de los perímetros de las categorías IV y V, 60% de las muestras en 1981 y 70% de las muestras en 2009. Esta coincidencia valida la evaluación de vulnerabilidad de los acuíferos de la zona, identificando las áreas con mayor vulnerabilidad intrínseca en el área de estudio par 1981 y que en el 2009 se ven afectadas por valores altos de nitratos en el agua subterránea.

## 6.6 USO DE SUELOS Y SU INFLUENCIA EN EL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN

El uso de pesticidas y compuestos agro-químicos utilizados en la agricultura combinados con zonas someras de aguas subterráneas, puede tener un gran impacto en la calidad hidrogeoquímica de las aguas subterráneas. Estos compuestos se disuelven en el agua de riego o la lluvia y se infiltran a través del perfil del suelo hasta alcanzar el nivel freático (Ahmed, 2009b).

Por esta importante razón, se consideró el impacto que produce el Uso del Suelo (US) en el método de evaluación de la vulnerabilidad DRASTIC, con el objetivo de determinar el riesgo a la contaminación en los acuíferos a causa de las actividades antropogénicas identificadas por el uso de suelo. Los centros urbanos se ubican en la zona central del área de estudio (Linares y Hualahuises), así como varios asentamientos humanos (comunidades ejidales) y extensas zonas destinadas al cultivo de cítricos.

El mapa de uso de suelo (Figura 6.13) se creó digitalizando una copia rígida de la Carta de Uso de Suelo publicada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y actualizado con el mapa de la ciudad de Linares del año 2007 elaborada por el Gobierno Municipal Linares (HAL, 2009; INEGI, 1982), posteriormente esta información se convirtió al formato de datos *raster* y luego fue reclasificada teniendo en cuenta la valoración sugerida por Panagopoulos *et al.* (2006).

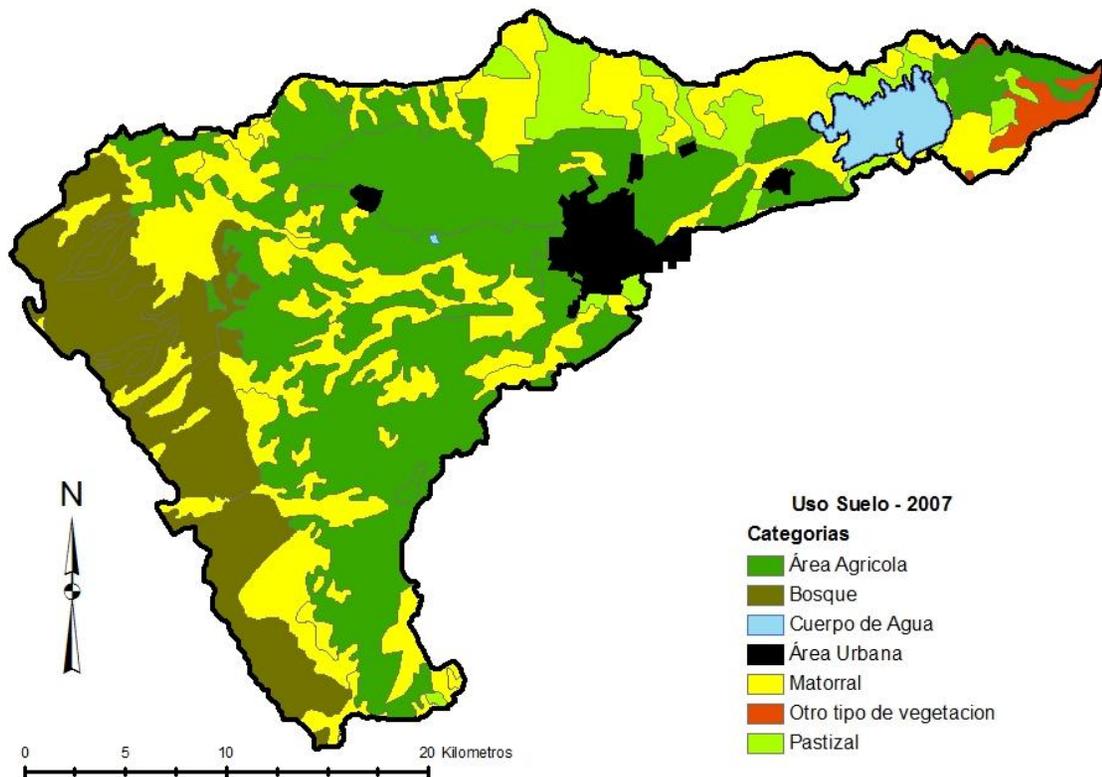


Figura 6.13 Mapa de Uso de Suelo del año 2007.

Tabla 6.8 Valoración para Usos de Suelo típicos (Panagopoulos *et al.*, 2006)

Parámetro DRASTIC	Adicional	Tipo de uso de suelo	Valor	Índice de Impacto	Índice Total
Uso de Suelo		Bosque mixto	1	5	5
		Matorral	2	5	10
		Pastizales naturales	3	5	15
		Granjas, Cultivos	10	5	50
		Asentamiento Urbano Consolidado	10	5	50

El índice de impacto del factor de uso de suelo será el más alto valor posible igual a 5, esta definición se realizó en base a la importancia ambiental de este factor y a las posibles altas concentraciones de plaguicidas y de nitratos en esas áreas (Panagopoulos *et al.*, 2006).

El mapa de uso de suelo, se reclasificó según la Tabla 6.8 obteniéndose como resultado el mapa en formato *raster*. Este mapa tiene el mismo formato que los mapas de los parámetros involucrados en el cálculo del IVD, por lo cual puede ser integrado matemáticamente sin problemas al mapa final de vulnerabilidad acuífera.

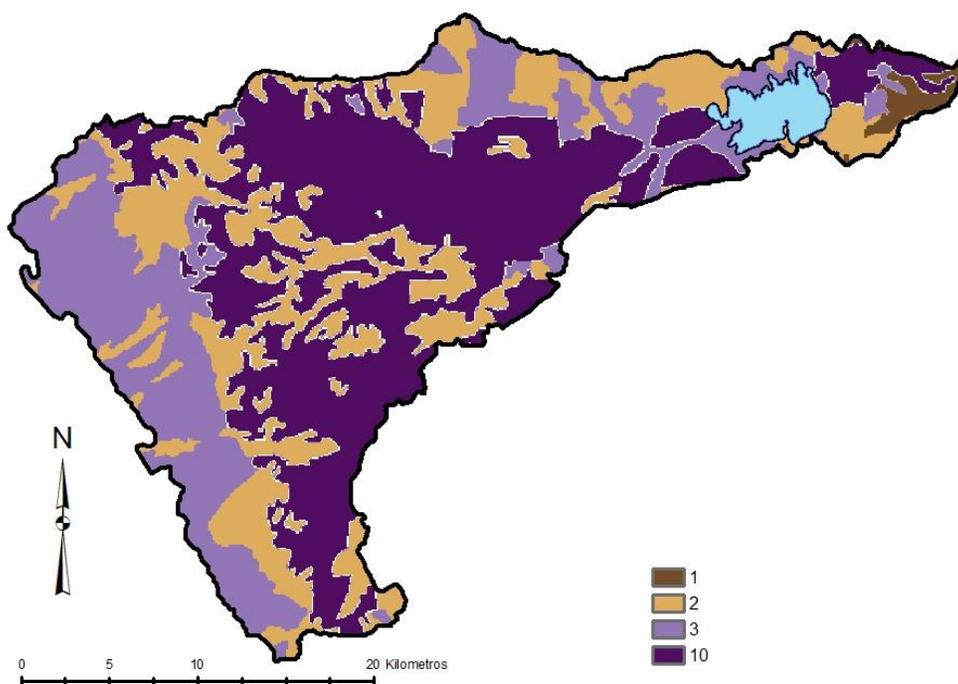


Figura 6.14 Reclasificación del Mapa de Uso de Suelo según valoración tabla 6.8 (marzo 2009).

## 6.7 ÍNDICE DEL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN

La ventaja de usar el mapa de uso de suelo como parámetro adicional en el método DRASTIC, se justifica si el objeto es determinar el impacto de las actividades humanas en el área de investigación evaluando el riesgo de contaminación de los acuíferos.

La incorporación matemática debe ser lineal de esa manera pudiéndose evaluar todos los parámetros en conjunto y obtener el Índice de Riesgo a la Contaminación (IRC) aplicando la siguiente ecuación:

$$IRC = IVD + US_r + US_w \quad (6.2)$$

Donde:  $IRC$  = Índice del Riesgo a la Contaminación

$IVD$  = Índice de Vulnerabilidad DRASTIC

$US_r$  = Valor para el Uso de Suelo

$US_w$  = Índice de Impacto del Uso de Suelo

Para el cálculo del IRC se utilizó el módulo *Raster Calculator* en ArcGIS, procedimiento por el cual se obtiene matemáticamente el IRC debido al uso de suelo (Figura 6.15). Cinco niveles de riesgo se obtuvieron luego de aplicar el método estadístico de cuantiles, estas cinco categorías son: Muy Alto Riesgo (208 - 254); Alto Riesgo (184-208); Riesgo Medio (163-184); Bajo Riesgo (149 - 163) y Muy Bajo Riesgo (102-149) donde el rango de valores final con la inclusión del parámetro Uso de Suelo varía entre 35 a 280 puntos, mínimo y máximo respectivamente.

La tabla 6.8 presenta la diferencia en la cobertura del área del IVD y los resultados obtenidos con la inclusión del Uso de Suelo, para el cálculo del IRC, compatibilizando las cinco categorías de vulnerabilidad y las cinco categorías de riesgo de contaminación.

**Tabla 6.9** Comparación de Resultados entre el IVD y el IRC.

Categoría	Evaluación del Acuífero IVD		Evaluación del Acuífero IRC		Diferencia Absoluta
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	
<b>Muy Bajo Riesgo (I)</b>	156.261	18.12	166.522	19.31	1.19
<b>Bajo Riesgo (II)</b>	207.309	24.04	210.004	24.35	0.31
<b>Riesgo Medio (III)</b>	221.802	25.72	154.390	17.90	7.82
<b>Alto Riesgo (IV)</b>	219.071	25.41	168.843	19.58	5.83
<b>Muy Alto Riesgo (V)</b>	57.841	6.71	162.525	18.85	48.25

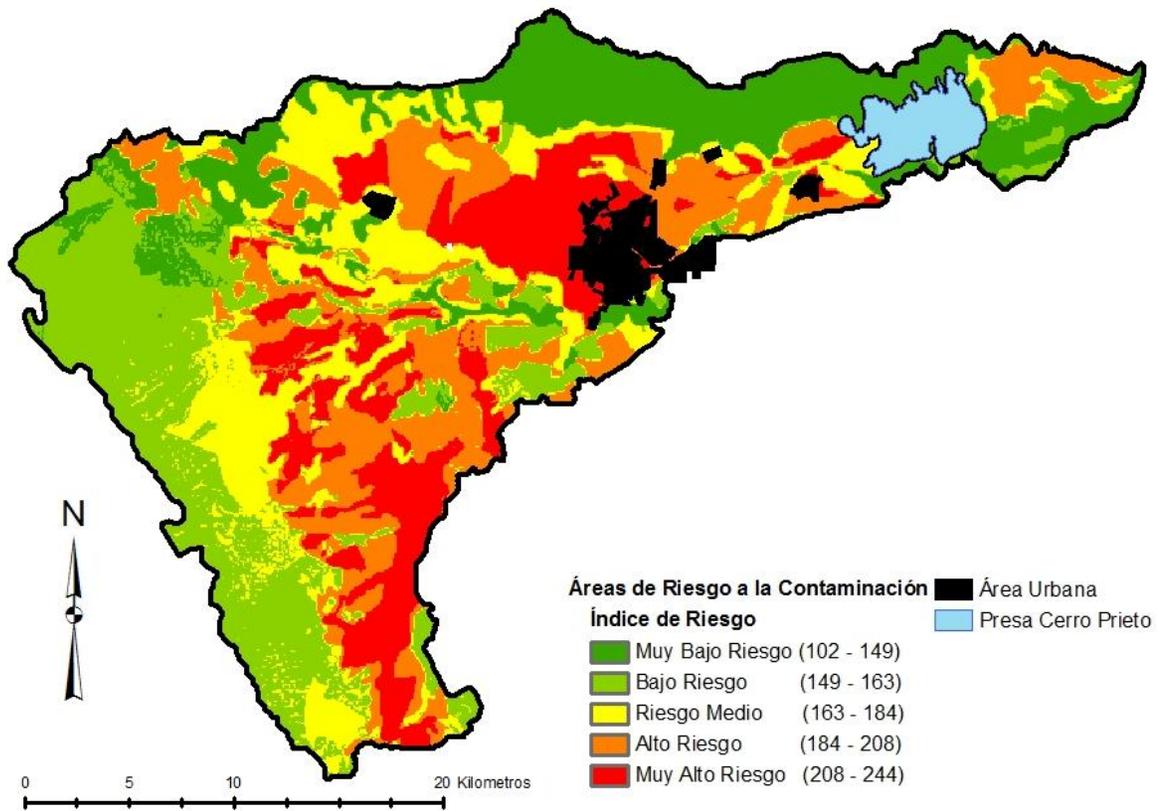


Figura 6.15 Índice de riesgo a la contaminación (2009).

## 6.8 CONCLUSIONES

Se aplicó el método DRASTIC integrado un SIG para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos en la porción nororiental de la CHRP sobre el área correspondiente a la PCGM. Además, se incluyó el impacto generado por los usos de suelo del área como variable que permite establecer los riesgos a la contaminación de los acuíferos.

Se creó un base digital de datos, información que sirvió para la elaboración de siete mapas hidrogeológicos de cada uno de los parámetros del método DRASTIC desarrollados en un entorno SIG y mediante la aplicación de módulos y comandos de ArcGIS, creándose el mapa del Índice de Vulnerabilidad DRASTIC (IVD).

Con el objetivo de realizar un análisis retrospectivo, se calculó el Índice de Vulnerabilidad DRASTIC para el año 1981, el parámetro que varía en el cálculo es la profundidad del nivel freático, el cual demostró ser útil para realizar evaluaciones de vulnerabilidad para diferentes periodos de tiempo. Los valores obtenidos en las cinco categorías de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, en el año 1981 son: Muy Alta Vulnerabilidad – V (167-207); Alta Vulnerabilidad – IV (159-167); Vulnerabilidad Media – III (147-159); Baja Vulnerabilidad – II (136-147) y Muy Baja Vulnerabilidad – I (91-136).

Para el año 2009 se obtuvieron, también, cinco categorías de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, que son: Muy Alta Vulnerabilidad – V (161-194); Alta Vulnerabilidad – IV (151-161); Vulnerabilidad Media – III (143-151); Baja Vulnerabilidad – II (128-143) y Muy Baja Vulnerabilidad – I (87 a 128).

Las diferencias de los valores de vulnerabilidad obtenidos entre 1981 y 2009 (Tabla 6.10), se deben principalmente al nivel freático, en 1981 más someros que en el año 2009 en la parte central del área estudiada, motivo por el cual los índices calculados para el año 1981 son mayores evidenciándose las siguientes diferencias. Estas diferencias se deben exclusivamente al método de categorización utilizado (método estadístico de cuantiles), el cual agrupa en cada categoría el mismo número de valores, muestras o datos. Los valores obtenidos en formato *raster* (células de 30 m de lado) varían dependiendo del cálculo interno del método DRASTIC evaluado con la ecuación del índice de vulnerabilidad DRASTIC.

**Tabla 6.10** Comparación de Resultados entre el IVD-1981 e IVD-2009.

<b>Índice de Vulnerabilidad DRASTIC</b>	<b>IVD - 1981</b>	<b>IVD - 2009</b>	<b>Diferencia IVD(1981)-IVD(2009)</b>
<b>IVD - mínimo</b>	91	87	4
<b>IVD entre I y II</b>	136	128	8
<b>IVD entre II y III</b>	147	143	4
<b>IVD entre III y IV</b>	159	151	8
<b>IVD entre IV y V</b>	167	161	6
<b>IVD máximo</b>	207	194	13

Los IVD correspondientes al año 1981 muestran zonas de mayor vulnerabilidad al suroeste del área de investigación, las cuales corresponden a las zonas de recarga de los acuíferos. El área más extensa con vulnerabilidad alta (Categoría V) se localiza en la zona central (región entre Linares y Hualahuises). En dirección noroeste (entre Linares y la PCP), se presentan zonas de alta vulnerabilidad categorías IV y V (Figura 6.10).

El mapa de vulnerabilidad del año 2009, presenta coincidencia de mayor vulnerabilidad hacia el suroeste (zonas de recarga) comparado con el mapa correspondiente a 1981. Pero en la zona central del área estudiada se presenta la principal diferencia, donde la categoría IV es la predominante, reduciendo significativamente la zona cubierta por la categoría V, la cual presenta una concentración al norte de Linares. Finalmente, la vulnerabilidad de categoría V hacia el oeste de Linares se ve reducida y concentrada en el límite este de la PCP, hecho que se explica por los

niveles más someros de agua subterránea influenciado por el tirante de agua acumulada en la PCP (Figura 6.8).

Entre los años 2006-2010, se determinó la vulnerabilidad de los acuíferos en cuenca del río Pabillo (Método DRASTIC), utilizando datos del año 2007, los cuales indican que se presentan dos zonas importantes de vulnerabilidad, la zona de recarga (sector oeste de la PCGM que colinda con la SMO) y la zona de descarga (sector de la Presa Cerro-Prieto), (Moreno-Esparza, 2009). Los parámetros generales de vulnerabilidad se parecen a los resultados calculados para la situación del año 2009.

La validez de los mapas de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos se ve demostrada por dos razones principales: a) La mayoría de las concentraciones altas de nitratos para 1981 y 2009 se ubican al interior de los perímetros de categorías IV (alta vulnerabilidad) y V (muy alta vulnerabilidad), en ambas evaluaciones se tiene aproximadamente una coincidencia de 70% (Figuras 6.11 y 6.12), y b) Las zonas de mayor vulnerabilidad en 1981 presentan actualmente (análisis hidrogeoquímico de muestras de 2009) los mayores contenidos de nitratos ubicándose en las áreas donde la categoría V es dominante, hecho que nos permite evidenciar la evolución de nitratos, siendo este un indicador de posibles fuentes de contaminación acuífera en el periodo 1981-2009.

El mapa de Uso de Suelo se preparó en ArcGIS para calcular el impacto de las actividades humanas sobre los acuíferos, parámetro con el cual se determinó el Índice de Riesgo a la Contaminación (IRC), procedimiento que tiene la finalidad de evidenciar posibles fuentes de contaminación. El mapa parametrizado y reclasificado de Uso de Suelo (Figura 6.14) demostró ser un parámetro válido y útil en la determinación del riesgo contaminante.

Esta modificación al método DRASTIC permite identificar la interacción entre el medio humano y el medio hidrogeológico, generándose un mapa sencillo y de fácil interpretación (Figura 6.15). Los valores finales de IRC correspondientes a 2009, se agruparon en cinco categorías, que son: Muy Alto Riesgo (208-244), Alto Riesgo (184-208), Riesgo Medio (163-184), Bajo Riesgo (149-163) y Muy Bajo Riesgo (102-149).

El riesgo a la contaminación acuífera calculado resalta las áreas conflictivas, prueba de ello es la variación importante entre las áreas cubiertas por las categorías Riesgo Medio, Alto Riesgo y Muy Alto Riesgo donde presentan modificaciones en su cobertura de 7.82, 5.83 y 48.25% respectivamente. La zona central del área es la más conflictiva, correspondiendo a las regiones destinadas a producción agrícola y a los asentamientos urbanos, esta tendencia también está verificada por el contenido alto de nitratos para el 2009 que presenta sus mayores

concentraciones en la misma región, lo cual induce a concluir que esta zona ha sido y está siendo contaminada por las actividades antropogénicas.

La vulnerabilidad y la evaluación de riesgos a la contaminación de la porción noreste de la Cuenca Hidrológica del Río Pabillo indican que los recursos de las aguas subterráneas son limitados y sensibles para lograr el desarrollo sostenible de la ciudad de Linares y pone en riesgo la calidad hidroquímica de la reserva de agua de la Presa Cerro Prieto segunda mayor fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Monterrey y su área conurbada.

## 7. HIDROGEOLOGÍA URBANA

### 7.1 INTRODUCCIÓN

Conservar, gestionar y proteger el agua subterránea (AS) como recurso hídrico es una importante necesidad en las ciudades alrededor del mundo, razón por la cual, se creó la “Comisión de Aguas Subterráneas en Áreas Urbanas” en la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH – 1993). Esto con el objetivo de investigar el impacto del medio urbano sobre la calidad y cantidad de AS (Morris *et al.*, 2006; Shanahan, 2009; Vázquez-Suñe *et al.*, 2005; Wolf *et al.*, 2007).

La tendencia actual de la población mundial, es una reducción en el área rural que prioriza el vertiginoso y espectacular incremento de la población urbana creando las megaciudades. El factor más importante en el ambiente del agua dentro de las ciudades son los seres humanos que producen el desarrollo industrial en áreas urbanas, que repercuten en problemas de cantidad y calidad del AS, lo cual ocasiona deterioro en la infraestructura civil subterránea (Al-Sefry y Sen, 2006; Custodio, 2004; Grischek y Nestler, 1996; Welty, 2009).

Como producto de la necesidad de conocer los procesos y parámetros que intervienen en la protección, explotación, uso, conservación y vertido del AS considerada como recurso natural valioso y limitado dentro del medio urbano, emerge dentro de las ciencias geológicas una nueva rama científica denominada “Hidrogeología Urbana” (HU), (Custodio, 2004).

La HU investiga los procesos hidrodinámicos del AS como son la recarga, el uso, la calidad, el manejo, la preservación y las repercusiones en los acuíferos bajo las ciudades. Se orienta al abastecimiento de la población, de las industrias, de comercios, de áreas de riego intensivo y de recreo. La HU juega un rol preponderante en la solución de los problemas de demanda de agua potable, de contaminación, subsidencia y colapso del terreno, de interacción con la infraestructura urbana e inestabilidad de taludes y encharcamientos persistentes (Custodio, 2004; Llamas y Custodio, 2003).

La relación entre las Aguas Subterráneas (ASs) y el desarrollo socioeconómico de las ciudades justifican los estudios de HU; las urbanizaciones afectan la disponibilidad y calidad del AS que tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, económicas y políticas. En los países en desarrollo la HU prioriza los términos económicos y ambientales por tener una creciente y constante demanda de agua en sus ciudades. Las cuestiones espacio-temporales que se deben

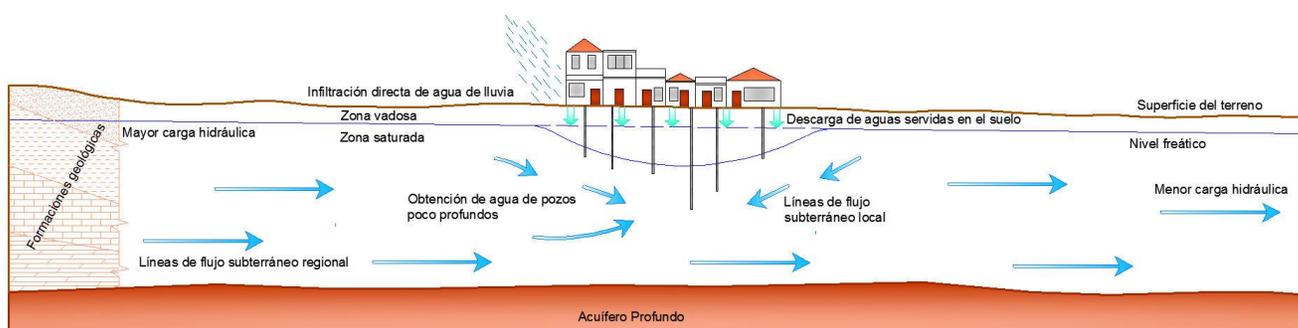
analizar son: a) ciclo del AS relacionado al desarrollo de la urbanización; b) oscilaciones de los niveles de AS debidos a la explotación humana; c) contaminación de AS producida por la actividad antropogénica; y d) la distribución de infraestructura subterránea y su relación a los flujos de AS (Vázquez-Suñe *et al.*, 1999; Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).

Alrededor del mundo son muchos los casos donde las ciudades tuvieron y tienen que enfrentar problemas relacionados al AS, la cual debe ser tratada como un recurso valioso y a la vez, como un problema debido al ascenso de niveles freáticos (NFs) y AS contaminada (Lerner y Barrett, 1996).

## 7.2 RELACIÓN ENTRE LOS PROCESOS DE URBANIZACIÓN Y EL AGUA SUBTERRÁNEA

En el mundo actual los países en desarrollo presentan el mayor índice de crecimiento demográfico, sus tasas de crecimiento urbano y poblacional no tienen comparación en la historia de la humanidad. El porcentaje de personas de bajos recursos económicos viviendo en los asentamientos periurbanos, oscila entre el 30% y el 60% del total de la población, lugares donde el AS es un factor importantísimo que soporta en el desarrollo urbano. De manera general, la evolución de las ciudades atraviesa las siguientes etapas (Foster *et al.*, 2001; Shanahan, 2009; Shen, 2008; Takisawa, 2008a):

**Ciudad pre-industrial - usando ASs locales:** Predominan los pozos poco profundos para autoabastecerse de AS. Los vertidos de aguas servidas se depositan en pozos negros y tanques sépticos en cada una de las viviendas (Figura 7.1).



**Figura 7.1** Esquema teórico de la situación de la Ciudad pre-industrial. Modificado de Foster *et al.* (2001).

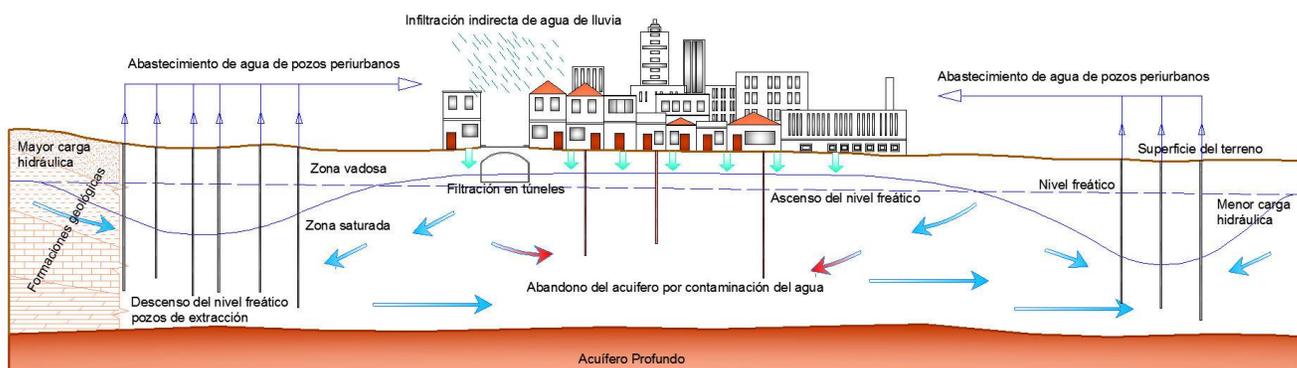
**Ciudad industrial – disminución de los niveles de agua:** Es la consecuencia del desarrollo industrial donde se incrementa la demanda de agua, y se consolida la extracción de AS para abastecer los sistemas de suministro de agua potable y de alcantarillado (Figura 7.2). Los acuíferos experimentan importantes descensos del NF, ocasionando los siguientes efectos: subsidencia de

terreno, profundización de pozos de extracción, elevación de costos, intrusión de agua salina (ciudades costeras), reducción de la resistencia del suelo lo cual afecta las cimentaciones de los edificios (Downing, 1993).



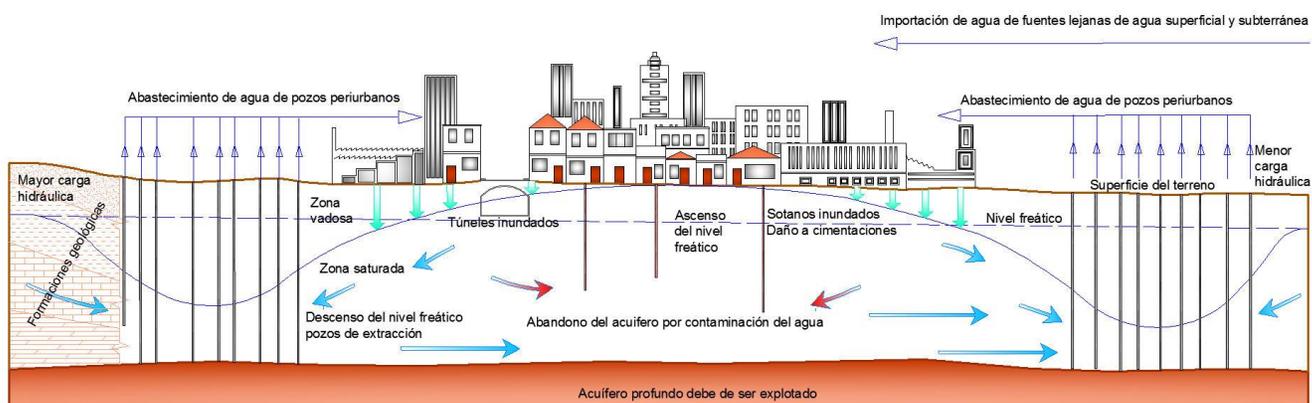
**Figura 7.2** Esquema teórico de la situación de la ciudad pre-industrial. Modificado de Foster *et al.* (2001).

**Ciudad post-industrial – Aumento del nivel del AS:** Los NFs se recuperan a los niveles originales, se produce una transición a una economía post-industrial, la contaminación industrial hace que se abandonen los pozos, por lo cual se implementa el abastecimiento de fuentes de agua distantes y seguras (Figura 7.3). Las ASs ascendentes afectan las propiedades estructurales de los edificios, la capacidad de suelos de soportar carga, se produce expansión de suelos, se presentan sub-presiones hidrostáticas y encharcamientos poniendo en riesgo los sistemas de aguas servidas, producen infiltración en los alcantarillados y afectan las mamposterías y el concreto (Bassington, 1990; Johnson, 1994).



**Figura 7.3** Esquema teórico de la situación de la Ciudad post-industrial. Modificado de Foster *et al.* (2001).

**La futura ciudad bajo el cambio climático y el crecimiento poblacional:** El cambio climático modificará el volumen y repartición de la recarga del AS, debido a las intensas lluvias en regiones altas-tropicales y reducción de la lluvia en las latitudes subtropicales (IPCC, 2007). Las ciudades en el futuro necesitarán suministrar mucha más agua y hacer frente a mayores inconvenientes de contaminación y aguas residuales, estos efectos se muestran en la Figura 7.4 (Shanahan, 2009).



**Figura 7.4** Esquema teórico de la situación de la Ciudad bajo crecimiento poblacional y cambio climático. Modificado de Foster *et al.* (2001).

El proceso de urbanización modifica radicalmente el contexto de la recarga y afecta desfavorablemente la calidad de las ASs. El cambio de uso de suelo, modifica el sistema de infiltración, impermeabiliza la superficie y cambia el drenaje natural. La pérdida del volumen de agua en las tuberías de suministro y alcantarillado e infiltraciones de las aguas servidas afectan la recarga del acuífero modificando la calidad del AS. La sobreexplotación del AS produce el descenso en los NFs y en las ciudades localizadas sobre ciertos tipos de acuíferos se presenta problemas de subsidencia del terreno (ST), (Custodio, 2004; Foster *et al.*, 2001; Hayashi, 2008; Lamptey *et al.*, 2005).

Posteriormente, la reducción del volumen de AS explotado de los acuíferos produce ascenso del nivel del AS dañando o inundando túneles y ductos de servicio, también ocasiona el deterioro de la calidad del AS. En términos generales, el proceso de urbanización causa una contaminación difusa y grave del AS introduciendo compuestos de nitrógeno, azufre, niveles elevados de salinidad, derivados de petróleo, hidrocarburos clorados y otros compuestos sintéticos al sistema natural (Foster *et al.*, 2001).

### 7.3 PROCESOS Y EFECTOS HIDROGEOLÓGICOS QUE INVESTIGA LA HIDROGEOLOGÍA URBANA

#### 7.3.1 Recarga de agua subterránea

La construcción de techos y superficies pavimentadas como: calles, caminos, aparcamientos, instalaciones industriales y aeropuertos causan impermeabilización del suelo, por lo cual, la recarga directa se reduce, esta reducción queda compensada por la recarga indirecta donde se introducen nuevas fuentes como la infiltración en grietas, en sumideros de aguas pluviales, en estanques, en pozos negros, en tanques sépticos y filtraciones de los sistemas de suministro y alcantarillado con volúmenes que pueden igualar el volumen de recarga natural o inclusive

excederlo (Al-Sefry y Sen, 2006; Baker, 2009; Foster *et al.*, 2001; Foster *et al.*, 1994; Grischek y Nestler, 1996; Hayashi, 2008; Lerner, 1989; Lerner, 1990; Lerner y Barrett, 1996; Mohrlök *et al.*, 2008; Price y Reed, 1989; Shanahan, 2009; Sharp *et al.*, 2006; Sharp *et al.*, 2003; Vázquez-Suñe *et al.*, 1999; Welty, 2009).

El volumen de agua que circula por las tuberías de distribución es considerablemente alto con relación a la lluvia excedente que genera la recarga. Entre el 30 y 60 % del volumen total abastecido se filtra convirtiéndose en recarga al acuífero. Si no existe red de alcantarillado, más del 90% del volumen de abastecimiento termina como recarga por medio del vertido de aguas servidas que se efectúan en el subsuelo a través de unidades de saneamiento in situ. (Butler y Verhabgen, 1997; Custodio, 2004; Foster *et al.*, 2001; Mohrlök *et al.*, 2008; Vázquez-Suñe *et al.*, 2000; Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).

Las fugas presurizadas de los sistemas de distribución, grietas en áreas de estacionamiento y fisuras de superficies impermeabilizadas actúan como focos puntuales de recarga a los acuíferos. Canalizaciones de servicios públicos y túneles pueden actuar como vías preferenciales de flujo de AS, alterando drásticamente la permeabilidad efectiva de la subsuperficie (Baker, 2009; Sharp *et al.*, 2006; Sharp *et al.*, 2003; Welty, 2009).

### 7.3.2 Sistemas de flujo del agua subterránea

Un sistema de flujo es la interrelación de entidades (medio geológico y agua) que se comportan bajo patrones definidos (diferencia de presiones y de cargas hidráulicas) y cuya función es operar sobre la materia y la energía (transporte de materia y dilución de rocas). Este sistema considera elementos conectados ocasionando procesos de causa y efecto a lo largo del tiempo (Domenico, 1972).

El estudio del sistema de flujo del AS, es útil en la gestión del recurso en todos los niveles. Este análisis proporciona el medio para conocer el origen, recorrido y destino del AS, que al estar determinados por las características físico-químicas del agua y del medio geológico proporcionan información importante referida a la calidad hidrogeoquímica y la historia del AS (Bair y Roadcap, 1992; Bakker y Strack, 1996; Stuyfzand, 1999; Zaadnoodijk *et al.*, 2004).

Para diferenciar un sistema de flujo urbano de los sistemas de flujo naturales, se deben tomar en cuenta: a) la evolución histórica urbana incluyendo los cambios progresivos en el uso de suelo; b) la recarga en un área dada directamente relacionada a la densidad poblacional; c) la extracción de AS por privados e industrias; y d) las estructuras urbanas subterráneas y su interacción con el flujo de AS (Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).

El sistema de flujo subterráneo se modifica principalmente a causa de los cambios temporales del volumen de AS explotada en los pozos de extracción, también, por la infiltración de aguas de ríos y lagos como resultado del excesivo bombeo de AS del acuífero que alteran las direcciones del gradiente hidráulico (Grischek y Nestler, 1996; Zaadnoodijk *et al.*, 2004).

### 7.3.3 Calidad del agua subterránea y principales contaminantes

#### - Fertilizantes y pesticidas

Las ASs y superficiales están bajo serio riesgo de contaminación debido al excesivo uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura para mejorar la producción agrícola, debido al rápido crecimiento poblacional y el desarrollo tecnológico alrededor del mundo (Ekemen-Keskin, 2010).

Las áreas de transición de usos de suelo agrícola a urbano, son fuentes de contaminación del AS por un exceso en el uso de pesticidas y fertilizantes en base al nitrógeno, también se puede producir la salinización del suelo debida a las prácticas de riego (Shanahan, 2009).

A veces, los contenidos de nitratos son menores en las áreas urbanas debido al uso extendido de fertilizantes en áreas intensamente cultivadas (Takisawa, 2008a). La contaminación por nitrato en las ciudades tiene fuentes difusas, por lo que la correlación con el uso de suelo no es sencilla y a veces es imposible. La presencia de sulfatos puede deberse a la posible adición de emisiones industriales y fugas de los alcantarillados urbanos (Burston *et al.*, 1993; Ford y Tellam, 1994; Lerner *et al.*, 1994).

Otra actividad contaminante es el abandono de pozos y obras de captación de AS, debido a la infiltración directa de agua de mala calidad con presencia de microorganismos, amonio, nitritos y un alto contenido de nitratos y aumento de la dureza y salinidad del AS (Apodaca *et al.*, 2002).

#### - Aguas servidas

Las posibles fuentes urbanas de contaminación por nitratos son: industrias, alcantarillados y zonas de recreación (Foster *et al.*, 2001).

La contaminación por nitrato es el tipo más prevalente de contaminación antropogénica y está fuertemente relacionada al patrón del uso de suelo (Ator y Denis, 1997; Elhatip *et al.*, 2003; Kuroda y Fukushi, 2008; Rajmohan *et al.*, 2009).

La contaminación debida a fugas de los sistemas de alcantarillado en las ciudades es reconocida como un gran problema. En acuíferos kársticos muy permeables el vertido directo de aguas servidas por medio de tanques sépticos, letrinas y pozos negros, genera contaminación, la cual es mayor en los pozos someros comparada con los pozos profundos, pero estos últimos también están seriamente afectados con el paso del tiempo (Foster *et al.*, 2001).

Cuando el subsuelo posee Formaciones casi impermeables, las aguas residuales se descargan a los ríos. Bajo esta condición los acuíferos cercanos pueden presentar elevadas concentraciones de nitrógeno en las ASs. La ausencia de alcantarillado entubado para la recolección de efluentes domésticos, industriales y drenaje pluvial causa el vertido en el suelo, por esta razón se produce el deterioro de los acuíferos por concentraciones elevadas de nitrato y cloruro bajo los distritos densamente poblados (Foster *et al.*, 2001; Takisawa, 2008a).

En resumen, las concentraciones altas de nitrato, cloruro y sulfato en las AS son evidencia de contaminación proveniente de las actividades antropogénicas desarrolladas en las ciudades y sus alrededores (Nagarajan *et al.*, 2010).

#### - Metales pesados y compuestos volátiles

En varios estudios alrededor del orbe, se determinaron los siguientes compuestos químicos en el AS: iones mayores Na, Mg, Ca, K, I, SO<sub>4</sub>, contaminantes de nitrógeno como NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, y elementos traza como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, U, Zn, Fe, Mn, Br, Cs, Co, F, Sn, Sr, Te, Ba, B, S (Atabey, 2005; Danis, 2005; Fuge, 2004; Guo *et al.*, 2007; He *et al.*, 2005; Krishna y Govil, 2004; Kumbur *et al.*, 2008; McBride, 2004; Nouri *et al.*, 2006). La mayor fuente de contaminación por metales pesados en el suelo son los fertilizantes orgánicos (Mikayilov y Acar, 1998).

Los fertilizantes para jardines tienen efectos relacionados a altos contenidos de Hg, Pb, Zn, Cu (Manta *et al.*, 2002). La presencia de Pb, Cr, Cu, Zn, S, se debe a la contaminación del suelo debido a la industrialización y actividades agrícolas intensas (Krishna y Govil, 2004). En áreas agrícolas se evidencia la presencia de Cu, Mn, Cr, Ni, Mo y el incremento de los contenidos de SO<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub> (Guo *et al.*, 2007; Kumbur *et al.*, 2008). El uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, ocasiona contaminación del AS en muchos países en todo el mundo (Ekemen-Keskin, 2010).

El fosforo está presente en la mayoría de los fertilizantes, el uso de bio-sólidos y compost incrementa las cantidades de Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Mn en los suelos. La movilidad y disponibilidad de los elementos traza están controlados por varios procesos químicos y bioquímicos, como la precipitación, disolución, adsorción-desorción, complejación-disociación, y óxido-reducción. Todos estos procesos están afectados por el pH y los procesos biológicos del suelo y AS (He *et al.*, 2005).

La industria es la responsable de introducir metales pesados al AS, hecho que se verificó por la correlación de uso de suelo y presencia de metales (Burston *et al.*, 1993; Ford y Tellam, 1994; Lerner *et al.*, 1994; Takisawa, 2008a).

La contaminación por VOCs (Volatil Organic Compounds), fue detectada en varios lugares industrializados, también se pueden presentar productos petrolíferos fugados de tanques de almacenamiento de gasolineras y domicilios, por el lavado de las superficies de calles y por vertidos accidentales irregulares (Custodio, 2004; Drewes *et al.*, 2003; Kuroda y Fukushi, 2008; Panchow y Cherry, 1996).

La contaminación por VOCs se presentó en Birmingham y Coventry en Inglaterra, de Dresden en Alemania y de Mérida en México (Cook *et al.*, 1988; Foster *et al.*, 2001; Grischek y Nestler, 1996; Lerner y Barrett, 1996; Toussaint, 1994).

#### - Derivados de hidrocarburos y compuestos especiales

Se reportaron varios incidentes de derrames de derivados de petróleo, varios de estos contaminantes pueden disolverse en el AS. Los contaminantes orgánicos son peligrosos para la salud de las personas y el medio ambiente (Kessler y Rubin, 1987; Schellekens, 1974; Schirmer y Butler, 2004; Schwille, 1975; Vanlooque *et al.*, 1975).

Por otra parte, las concentraciones de los compuestos aromáticos son generalmente bajas (Grischek y Nestler, 1996). Un ejemplo de este tipo de contaminación es la ciudad de Dresden (Alemania), donde ~80 % de las ASs se encuentran contaminadas, presentando valores elevados de sulfato, boro, halógenos orgánicos absorbibles (AOX) y halogenados volátiles orgánicos (HOV), por lo que la temperatura del AS bajo las áreas urbanas tiene 2 a 3 °C mas que las zonas rurales debido a las reacciones hidroquímicas con presencia de dichos contaminantes. Los valores de conductividad eléctrica exceden los 1,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  los cuales son correlacionables con concentraciones altas de sulfatos y nitratos. Las concentraciones de sulfatos varían grandemente en el intervalo de 100-600 mg/l (Grischek y Nestler, 1996).

La presencia de disolventes orgánicos y el resultado del amplio uso de detergentes y sustancias similares y de componentes de Boro y EDTA se convierten en serios riesgos de contaminación de los recursos hídricos (Kuroda y Fukushi, 2008; Stenger *et al.*, 2006).

### 7.3.4 Sobreexplotación de acuíferos

La explotación de AS, depende de la disponibilidad de la misma en los acuíferos en zonas urbanas. El medio geológico sin duda es muy importante, debido a que las Formaciones geológicas almacenan AS. Las extracciones del acuífero suponen una disminución del almacenamiento de AS. En la realidad la designación de sobreexplotación de acuíferos es principalmente un adjetivo que trata de calificar a una evolución preocupante bajo determinados puntos de vista, sin que tenga una significación hidrodinámica precisa (Custodio, 2002; Kontogianni *et al.*, 2007).

La explotación y gestión de AS en el medio urbano, solo es posible si las Formaciones geológicas tienen una permeabilidad moderada o alta agrupándose en: *Sedimentos no consolidados*, que incluyen sedimentos aluviales, suelen contener grandes volúmenes de AS que permite la extracción económica y *Formaciones consolidadas* que cuando están fracturadas pueden ser muy permeables y contener grandes cantidades de agua (Foster *et al.*, 2001).

El mayor tema de preocupación en el estudio del AS ha sido la sobreexplotación (Custodio, 2004; Drewes *et al.*, 2003). La sobreexplotación se puede definir como la situación en la que durante varios años la extracción media de AS de un acuífero supera o se aproxima a la recarga media (CNA, 2007b; Custodio, 2002; Molina *et al.*, 2009).

Los impactos de la sobreexplotación de AS son: un descenso continuado del nivel del agua, menor volumen disponible de AS, un deterioro de su calidad, un encarecimiento del agua extraída, daños ecológicos e ineficiencia en el manejo del AS (Custodio, 2002; Lerner y Barrett, 1996; O'Shea, 1993; Shen, 2008).

Algunos ejemplos de este tipo de problemas fueron reportados en Brighthon, Liverpool, Londres, Birmingham (Inglaterra), Barcelona (España), Hanoi y Ho Chi Minh (Vietnam), Kathmandu (Nepal), Tokyo, Osaka y Nagoya (Japón), Yakarta (Indonesia), (Lerner y Barrett, 1996; O'Shea, 1993; Takisawa, 2008a; Vázquez-Suñe, 2003).

### 7.3.5 Fluctuaciones del nivel freático

La extracción de AS hace que baje el NF, si es considerable y centralizada, puede exceder la recarga local, con lo cual el nivel freático puede seguir bajando durante muchos años. Los pozos tienen en su alrededor la superficie freática la cual debido a la extracción forma un cono de depresión. Cuando muchos pozos están ubicados unos cerca de otros, los conos de depresión se llegan a superponer causando el descenso general del NF cambiando la distribución de la carga

hidráulica dentro del sistema acuífero (Foster *et al.*, 2001; Hooker *et al.*, 1999; Shanahan, 2009; Zhang *et al.*, 2010).

Las variaciones de los NFs en áreas urbanas dependen de tres factores principales que son: a) la transmisividad del acuífero (recarga vertical y el flujo horizontal); b) la heterogeneidad y anisotropía de los materiales que constituyen el acuífero; c) las explotaciones continuas de AS provocando un déficit de recarga (Wilkinson, 1994). A causa del descenso de los NFs, los costos de extracción se elevan porque se necesita un mayor consumo de energía para el bombeo reduciéndose la eficiencia y productividad de los pozos de extracción (Foster *et al.*, 2001; Hooker *et al.*, 1999; Shanahan, 2009).

El ascenso de los NFs se produce debido a: fugas en las tuberías de suministro de agua potable (del 20% al 30% del volumen total distribuido), filtración de pozos negros, recarga indirecta de la precipitación, exceso en la irrigación de jardines, fugas de tanques de almacenamiento en el subsuelo y fugas de los alcantarillados, además provocan licuefacción del suelo saturado, efecto que destruye la superficie y subsuperficie donde se encuentran localizadas edificios e infraestructura urbana (Al-Sefry y Sen, 2006; Hayashi, 2008).

En las épocas en que se presenta el descenso del NF, se favorece la construcción de infraestructura urbana porque la excavación no tiene la necesidad de drenaje ni de protecciones impermeables. Cuando los niveles de extracción disminuyen o cesan, se produce el ascenso del NF del AS, en esta situación se presentan serios problemas con las estructuras sepultadas o excavadas, las cuales pueden quedar inundadas temporal o permanentemente (Chilton, 1999).

Algunas ciudades han sufrido depresiones extensas entre 20 y 50 m Bangkok (Tailandia), Manila (Filipinas), Tianjin (China) y muchas otras entre 10 y 20 m Beijing, Shanghai y Xian (China), Madrás (India). En todos esos casos, ha habido un deterioro de la calidad de las ASs y/o asentamiento del terreno a raíz de la caída de los niveles. Aproximadamente 45 ciudades de China están experimentando algún tipo de asentamiento, lo que indica que la caída de los NFs es ciertamente generalizada. Varias ciudades de México también han tenido problemas asociados con la extracción excesiva, tal es el caso de la Ciudad de México, donde los niveles de los acuíferos de los sistemas entre montañas situados por debajo de la ciudad bajaron entre 5 y 10 m entre 1986 y 1992. Otro caso es el de León, Guanajuato (México) donde el NF bajo 90 m entre 1960 y 1990 y entre 1 y 5 m por año entre 1990-1995 (Foster *et al.*, 2001).

### 7.3.6 Subsistencia del terreno

La ST es uno de los mayores problemas en el intento de lograr un uso sostenible del AS en las ciudades (Aichi, 2008). El propósito de predecir la ST, es gestionar el uso óptimo del AS (Rahnama y Moafi, 2009). El AS sirve como elemento estructural en la subsuperficie, contribuye con la integridad geológica del terreno, la remoción del AS del sistema, puede destruir esta integridad y llevar a la ST (Shanahan, 2009). La continua y excesiva extracción de AS puede llevar a la ST que causa importantes pérdidas económicas (Ng *et al.*, 2009).

La ST, se presenta en depósitos de sedimentos recientes arcillosos, a causa de la disminución de la presión intersticial o bien colapsos locales si hay cavidades kársticas o sifonamiento y arrastre de arenas. La subsidencia puede ser de extensión regional, cuando es causado por bombeo excesivo y continuo de AS y por el peso de las construcciones (Abidin *et al.*, 2008; Larson *et al.*, 2001; Lobo-Guerrero, 2003; Ochoa-González y Carreón-Freyre, 2006).

El principio de tensión efectiva propuesta por Terzaghi (1925), es usado para explicar la ocurrencia de la ST relacionada al descenso de los NFs. Este efecto se produce cuando la presión de poro se reduce por el descenso del agua, la tensión efectiva aumenta produciendo que el esqueleto del suelo se compacte ocurriendo la ST, donde se supera el límite elástico de la deformación para pasar al dominio plástico, en el que la deformación es irre recuperable (Chen *et al.*, 2007; Galloway *et al.*, 1999; Kontogianni *et al.*, 2007; Ochoa-González y Carreón-Freyre, 2006; Pacheco-Martínez *et al.*, 2006a; Pacheco-Martínez *et al.*, 2006b; Zhang *et al.*, 2010).

La compactación de sedimentos sueltos y Formaciones geológicas forman “vacíos” que amenaza las cimentaciones de los edificios, que ocasionalmente, descansan sobre pilotes flotantes y producen asentamientos diferenciales debido a la heterogeneidad del suelo subyacente (Kontogianni *et al.*, 2007; Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).

La ST es gradual, repentina o con la presencia de grietas, debido al movimiento y deformación del material del subsuelo, por extracción de petróleo, gas o descenso del AS. El incremento en la presión efectiva por la reducción del AS induce la compactación del subsuelo no consolidado en las capas de suelo, finalmente la subsidencia ocurre (Arzate-Flores *et al.*, 2006; Kontogianni *et al.*, 2007; Rahnama y Moafi, 2009).

Las diferencias existentes en las unidades hidroestratigráficas, producen asentamientos diferenciales que daña edificios, caminos y otras estructuras superficiales y pueden provocar roturas graves en las instalaciones subterráneas como las tuberías principales y secundarias del sistema de suministro, las tuberías de alcantarillado y conductos de cables, los túneles y los tanques subterráneos, como es el caso de la Ciudad de México, donde existen cambios en los

niveles del suelo de hasta 9 m a causa de la extracción excesiva de AS (Foster *et al.*, 2001; Ng *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010).

La ST puede ser monitoreada por varios métodos como ser: extensómetros de nivelación (Bitelli *et al.*, 2000), estaciones totales (Leake, 1997), registros con GPS (Abidin *et al.*, 2008; Bitelli *et al.*, 2000) e interferometría de radares espaciales (Ferrati *et al.*, 2000; Ferrati *et al.*, 2001). El monitoreo de la subsidencia es una tarea importante en protección civil y decisiones de política pública (Kim *et al.*, 2007).

Las subsidencias de terreno debidas al descenso de AS, se presentaron en muchas regiones del mundo, como ser: Shanghai (China); Taipei (Taiwan), Cheshire (Gran Bretaña); Venecia (Italia); Ciudad de México, Morelia, Celaya, Querétaro, Aguas Calientes (México); Bangkok (Tailandia); Valles de San Joaquín y Valle de Santa Clara (California, USA); Wariake (Nueva Zelanda); Far west (Sud África), el valle de Latrobe (Australia), Su-Xi-Chang (China) Rafsajan (Iran), Brisbane, Camberra, Sydney, Newcastle, Perth (Australia), Busan (Korea), Yakarta (Indonesia), Thessaly (Grecia), Tokio y Osaka (Japón) (Abidin *et al.*, 2008; Adrian *et al.*, 1999; Aichi, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Gambolati y Frezze, 1973; Kim *et al.*, 2007; Kontogianni *et al.*, 2007; Lofgren, 1969; Ng *et al.*, 2009; Phien-wej *et al.*, 2006; Poland, 1982; Rahnama y Moafi, 2009; Takisawa, 2008b; Zhang y Wei, 2005; Zhang *et al.*, 2010).

### 7.3.7 Intrusión salina en ciudades costeras

A medida que baja el NF, puede invertirse la dirección de flujo y la interfaz entre el acuífero y las aguas salinas, avanza así tierra adentro. Una vez que la salinidad se ha difundido en el agua alojada en los poros de la matriz de grano fino del acuífero, su elución llevará décadas o siglos, incluso si se restablece un flujo de aguas dulces subterráneas hacia la costa (Foster *et al.*, 2001).

El descenso de los niveles de AS puede provocar intrusión de agua marina que trae agua salada rica en sulfatos que en contacto con el concreto y acero de refuerzo de las cimentaciones y estructuras sepultadas acelera las tasas de corrosión (Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).

Un ejemplo muy claro de este problema es la ciudad de Yakarta (Indonesia), que está afectada por la intrusión de agua de mar, originada por la inversión del régimen de flujo subterráneo, a consecuencia de la sobreexplotación acuífera (Abidin *et al.*, 2008).

#### 7.4 POLÍTICAS DE GESTIÓN AMBIENTAL RELACIONADAS A LA HIDROGEOLOGÍA URBANA

La sobreexplotación y contaminación del AS se ha convertido en el mayor problema ambiental. En la mayoría de ciudades de los países industrializados y en desarrollo, las ASs están contaminadas por nitrato y nitrógeno amoniacal debido a la excesiva aplicación de fertilizantes y/o la infiltración de aguas residuales, a pesar de que está reconocido que lo más importante es proteger la calidad y cantidad del AS (Takisawa, 2008a; Takisawa, 2008b).

Los países con mayor escasez de agua son: China, India, México, España, Egipto, Kazajstán, Irán, Australia, Pakistán, que después de muchos años de sobreexplotación de acuíferos enfrentan problemas con sus sistemas de manejo del agua urbana, presentando actualmente problemas de descenso del NF, contaminación de AS, subsidencia del terreno e intrusión de agua de mar. Mejorar el manejo de los recursos de AS es una necesidad urgente para mitigar los problemas ambientales provocados por la explotación y contaminación de acuíferos. Por lo cual un enfoque integral para la mejor gestión de agua debe incluir mejoras tecnológicas, legislación y manejo en las ciudades de los países en desarrollo (Shen, 2008).

El AS es difícil de monitorear y gestionar y es considerada solo cuando se presenta una situación crítica. La gestión de las ASs representa un desafío político especial. El público y los tomadores de decisiones conocen muy poco acerca del estado del AS como recurso. Los cambios negativos en la calidad y cantidad del agua pueden producirse durante años o décadas sin acción o noticia alguna. Por tanto, es necesario incluir herramientas de manejo, monitoreo, difusión y regulación en las políticas relacionadas a la gestión del AS (Shanahan, 2009; Takisawa, 2008a).

El tratamiento y eliminación de las aguas servidas domésticas en las ciudades florecientes de los países en desarrollo es una prioridad para proteger el AS urbana (Takisawa, 2008a). La disminución de la disponibilidad y el empeoramiento de la calidad de las ASs son problemas comunes. La continuidad de la explotación de AS dependerá de la confiabilidad y el costo del bombeo, en comparación con el costo de los servicios municipales (Foster *et al.*, 2001).

Se debe plantear si la disposición de efluentes líquidos (aguas servidas y tratadas) en el suelo es factible, para lo cual se debe considerar: a) Si el tipo y la densidad de los sistemas de saneamiento in situ tienen un efecto serio en la calidad de las ASs; b) Si los alcantarillados y la calidad de las aguas servidas descargadas aguas abajo, perjudican los intereses de los usuarios de las ASs (infiltración de una recarga de mala calidad); c) Si la ubicación, el diseño y el funcionamiento de los rellenos sanitarios que reciben desechos sólidos son aceptables (Lixiviados en contacto con AS) (Foster *et al.*, 2001).

Con relación a la infraestructura urbana, los impactos que suelen presentarse se clasifican en: a) *NF descendente*, daño físico a los edificios e instalaciones subterráneas tales como túneles, alcantarillado y tuberías de agua como resultado del hundimiento y asentamiento del terreno; b) *NF ascendente*, daño a las estructuras subsuperficiales ligeras como resultado del incremento del empuje ascendente hidrostático, inundación de instalaciones subterráneas, ingreso excesivo de AS en las alcantarillas y ataques químicos a los cimientos de hormigón, las instalaciones subsuperficiales y las estructuras subterráneas, cuando las ASs están contaminadas con una acidez elevada o con altas concentraciones de sulfatos o solventes orgánicos (Foster *et al.*, 2001).

Si el NF alcanza la superficie puede causar problemas con los suelos y formar arroyos y llenar depresiones; si el agua de recarga que forma estos arroyos, es de mala calidad debido a fugas de los efluentes de pozos negros o de los sistemas de alcantarillado donde se origina el crecimiento espontáneo de vegetación alimentada por el AS, produce un impacto positivo dependiendo del lugar y el tipo de vegetación (Al-Sefry y Sen, 2006).

Los impactos también se presentan en la salud pública de los ciudadanos, por ejemplo, las AS con valores altos de Sólidos Totales Disueltos (STD) no son adecuados para consumo humano y riego (Fetter, 2001; Freeze y Cherry, 1979). Las aguas residuales de las fugas del alcantarillado son la mayor fuente contaminante con un impacto negativo en el AS (Foster y Chilton, 2004; Morris *et al.*, 2006; Reynolds y Barrett, 2003).

Cuencas hidrológicas son integradores naturales de cursos de agua, que pueden transportar contaminantes y otros impactos humanos. La gestión de AS en áreas urbanas en esencia no es diferente de las áreas rurales. Pero debe incluir permisos de bombeo, definición de usos permitidos, delineación de áreas de protección, identificación de contaminantes, monitoreo, etc. (Ames, 2002).

La disponibilidad de AS debe incluirse en la planificación de los recursos hidráulicos con el fin de lograr la sostenibilidad ambiental en base al estudio de: a) cuantificación de los volúmenes de AS; b) Usos posibles; c) Mejoras técnicas en la construcción de pozos de extracción d) Estudios de viabilidad económica; e) propuestas de manejo; f) sistemas de control del nivel piezométrico y g) la explotación del acuífero (Vázquez-Suñe *et al.*, 1999).

## 7.5 HIDROGEOLOGÍA URBANA DE LINARES

La villa de San Felipe de Linares fue fundada el 10 de abril de 1712 por el sargento mayor Don Sebastián de Villegas Cumplido, en homenaje al Virrey Don Fernando de Alencastre Noroña y Silva, Duque de Linares. Posteriormente, se trasladó porque se encontraba dentro de la jurisdicción

de Hualahuises (ahora municipio englobado en el municipio de Linares). En 1715 los vecinos de Linares tomaron posesión de la nueva Villa en los territorios ocupados por la tribu indígena de los "Ampapa Caegne Amiguas" (conocidos como los "come pescados"). El 19 de mayo de 1777 se erigió como ciudad y se estableció el Obispado de Linares, que fué el centro religioso más importante de la región. Debido a la colonización de la región del Nuevo Santander (Estado de Tamaulipas), Linares se convirtió en el centro estratégico de producción, acopio y tránsito de mercancías y personas de y hacia esta zona. Durante el siglo XVIII se constituyó en el primer productor de caña de azúcar en el norte de México (HAL, 2010).

Linares se localiza al sureste de la ciudad de Monterrey, en la región de la Planicie Costera del Golfo de México. EL municipio cubre una superficie de 2,445.20 km<sup>2</sup> en la zona central sur del estado de Nuevo León. Sus coordenadas son: 24°51' Latitud Norte y 99°24' Longitud Oeste, tiene una altitud media de 350 m.s.n.m. Sus límites son: al norte Hualahuises y Montemorelos; al sur y este el Estado de Tamaulipas y al oeste los municipios de Galeana e Iturbide. La ciudad está dispuesta en una retícula de calles con manzanas de ~70 m de lado, orientadas casi en dirección norte-sur y este-oeste. La catedral de San Felipe se construyó en 1779 y se colapso en el 2008 debido a intensas precipitaciones y la capilla del señor de la Misericordia fue construida en 1783. La ciudad de Linares es el centro urbano de mayor importancia en la región citrícola del Estado de Nuevo León y brinda servicios comerciales, de salud, educativos y asistenciales (HAL, 2009).

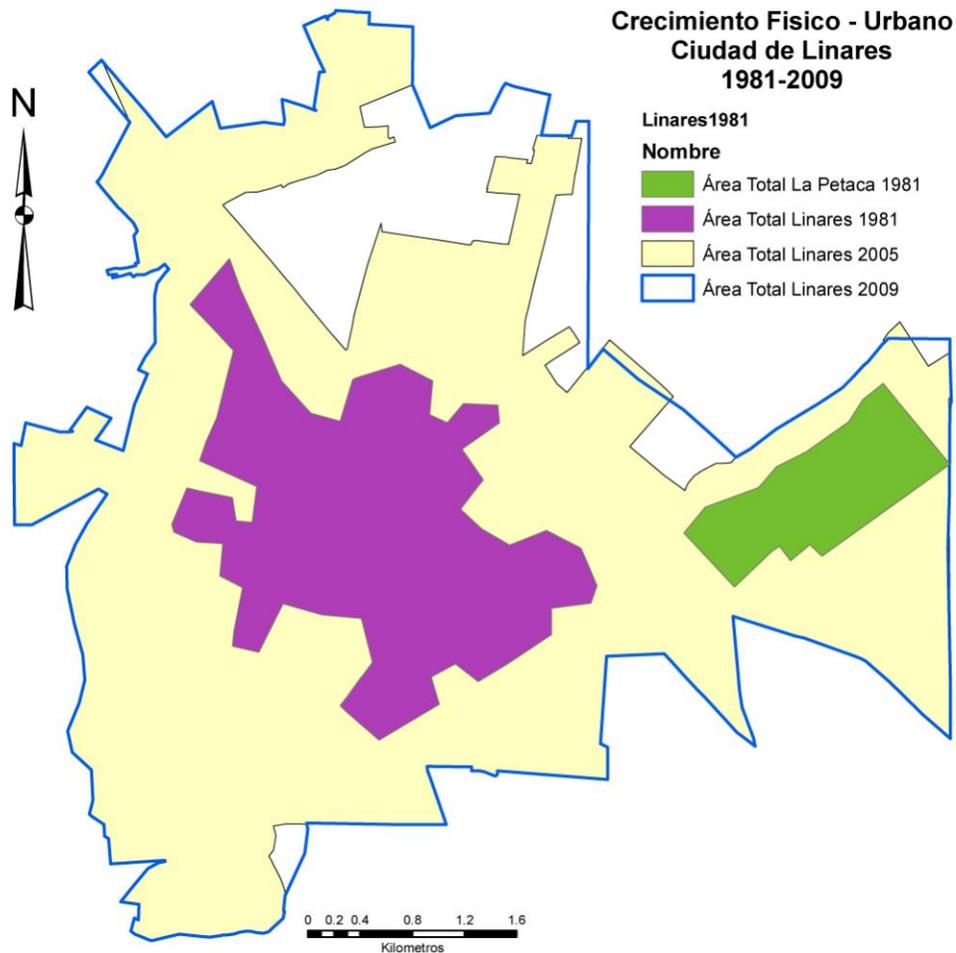
La economía de la región está basada en la Agricultura, que brindan una variedad de cultivos (maíz trigo, sorgo, avena forrajera, frutas tropicales de clima templado y principalmente cítricos. La ganadería es de menor escala, criándose ganado vacuno, asnal, caballo, caprino y bovino. El comercio es fuente importante de ingresos, existiendo giros comerciales como la venta de madera, cítricos, materiales y hielo. Se cuenta con establecimientos que abastecen a la población de alimentos, vestimenta, calzado, muebles para el hogar y oficina, refacciones, medicinas, automóviles y tractores (HAL, 2010).

El Parque Industrial de Linares cuenta con estímulos preferenciales para la desconcentración territorial de las actividades industriales. En esta zona operan industrias que fabrican carrocerías metálicas, hielo, materiales para construcción, fundición de hierro y acero, ensambladoras de cables, maquila de ropa, elaboración de ensaladas de fruta, procesadora de dulces, fábricas de muebles de madera, elaboración de alimentos pre-cocidos, elaboración de envases plásticos y elaboración de ductos de aire, entre otras actividades. Algunas de las empresas establecidas son: BIMBO; Leche LALA; talleres de carrocería como Industrias Juárez y RECASI; Fundiciones Linares, dedicada a la elaboración de placas; grandes consorcios como SIGMA ALIMENTOS y GOLLEK para la elaboración de cereales; RMC fabricación de ropa deportiva; MESMEX fabricante de bombas sumergibles; VERNELL elaboran dulces; KINGSTON Automotive de

México, se dedican al enderezado de defensas de automóviles y FRANKLIN Electric, fabricación de partes eléctricas para automóviles (HAL, 2010).

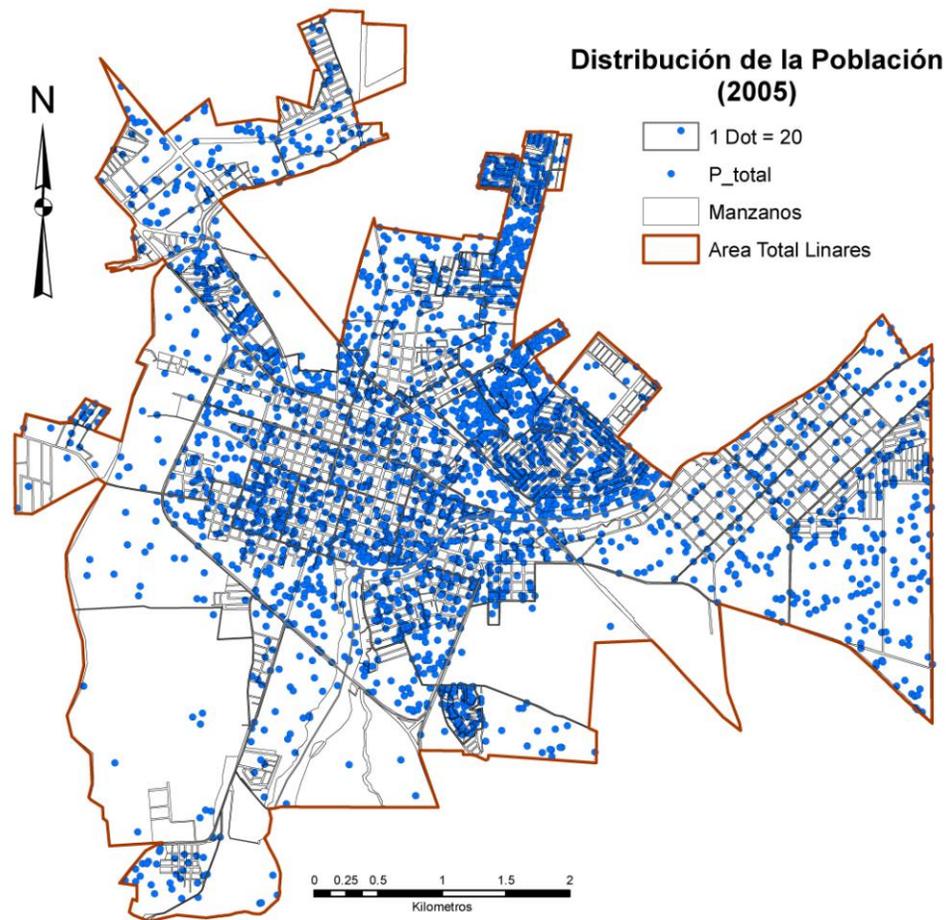
### 7.5.1 Análisis poblacional y crecimiento físico

Linares experimentó un crecimiento físico considerable durante los últimos 30 años. Para el año 1981 la expansión territorial de la ciudad cubría 5.7673 km<sup>2</sup> (Linares y La Petaca), en el año 2009, se calculó que el área de la ciudad es de 27.885 km<sup>2</sup>, lo cual demuestra un crecimiento de 4.8 veces en un lapso de 28 años, con una tasa de crecimiento físico de ~3% al año. Las poblaciones situadas en los alrededores de Linares tienen una superficie de: Hualahuises 4,74 km<sup>2</sup>, Ejido Guadalupe 1.25 km<sup>2</sup>, Ejido Rio Verde 0.74 km<sup>2</sup> y Ejido La Escondida con 0.4 km<sup>2</sup>. La Figura 7.5 esquematiza el crecimiento físico de la ciudad de Linares entre 1981 y 2009.



**Figura 7.5** Crecimiento físico de la mancha urbana de la ciudad de Linares entre 1981 y 2009. Digitalización INEGI (1981), Gobierno Municipal de Linares (2007) y actualización realizada en campo en 2009.

De igual manera la población de la ciudad de Linares se incrementó. La Figura 7.6 muestra la distribución espacial de los pobladores de Linares para el año 2005 (INEGI, 2005). Cada punto representa 20 personas, es claro que en la zona norte de Linares (Colonia Rio Verde) y en la zona central-norte (Colonias Provileon, Fomerrey y Cerrito) existe una concentración alta de habitantes. Las principales zonas de expansión se presentan hacia el norte (Zona Industrial) y el noreste (Provileon Fomerrey y la Petaca).



**Figura 7.6** Distribución de la población urbana de la ciudad de Linares (2005)

La Figura 7.7 y la Tabla 7.1 presentan los datos de densidad de población para el área urbana de Linares, expresados en habitantes por  $\text{km}^2$ . Las mayores concentraciones poblacionales se encuentran en colonias con mayor número de viviendas en espacios más reducidos alcanzando  $\sim 16,000 \text{ hab}/\text{km}^2$ , la zona central tiene una densidad  $\sim 5,700 \text{ hab}/\text{km}^2$ , y en los alrededores se registra una densidad menor a  $1,500 \text{ hab}/\text{km}^2$ .

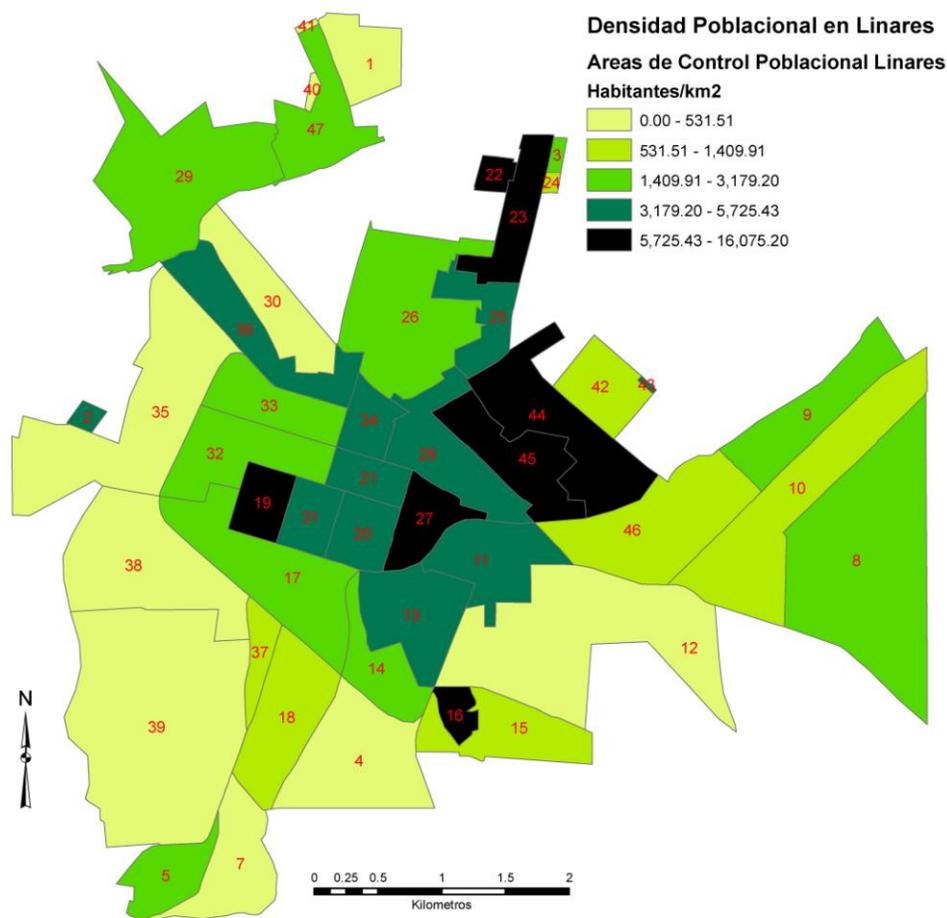


Figura 7.7 Distribución de la densidad poblacional

Tabla 7.1 Densidad Poblacional por áreas de control poblacional

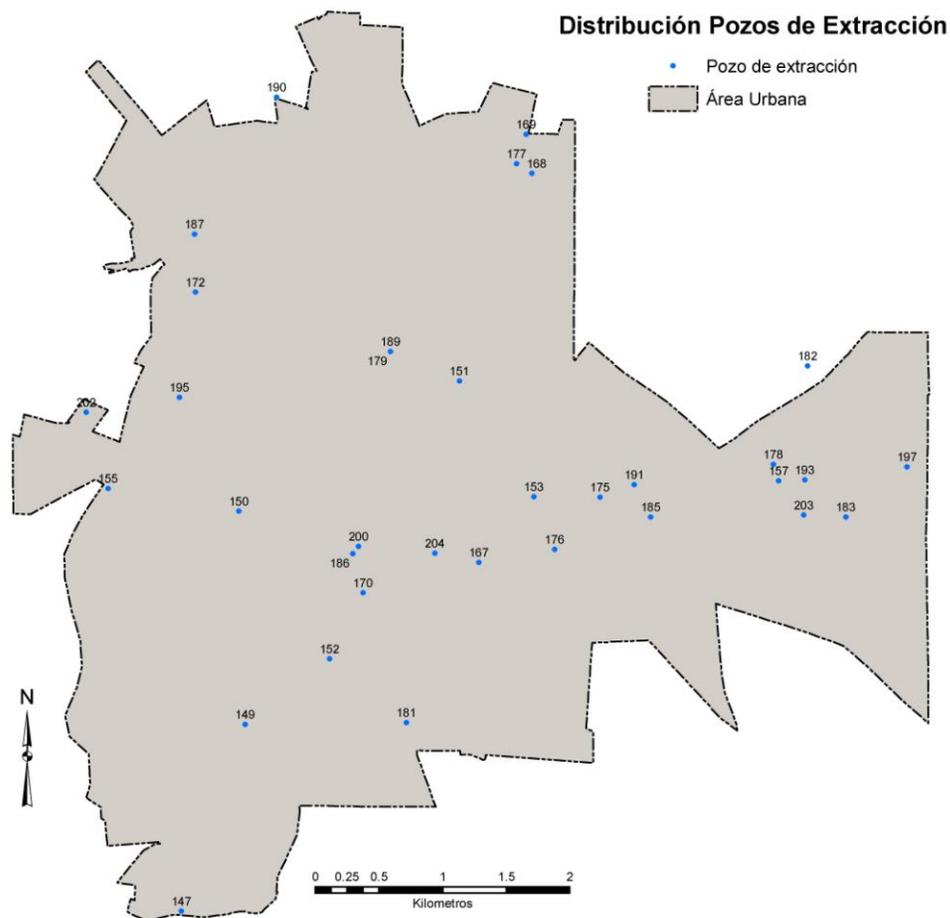
Código	Densidad (Hab/km <sup>2</sup> )	Código	Densidad (Hab/km <sup>2</sup> )	Código	Densidad (Hab/km <sup>2</sup> )
1	0.00	18	791.47	33	2391.06
2	5376.06	19	7211.58	34	4312.94
3	1755.91	20	5397.81	35	531.52
4	96.56	21	3839.87	36	5725.44
5	1818.95	22	16075.20	37	1385.59
7	215.63	23	8195.48	38	345.91
8	1922.71	24	1157.36	39	87.19
9	1882.23	25	4057.99	40	0.00
10	1356.14	26	2482.39	41	0.00
11	4427.33	27	7195.97	42	786.55
12	38.10	28	3924.90	43	4892.42
13	4864.27	29	1409.91	44	8476.93
14	2028.08	30	188.00	45	7784.97
15	910.33	31	4344.41	46	1254.00
16	11009.10	32	3179.21	47	2044.19
17	2539.30				

### 7.5.2 Análisis de la explotación, distribución, uso y desecho del agua subterránea

Con el fin de conocer los volúmenes de explotación y de uso del agua extraída de los acuíferos y de la captación de agua superficial se evaluó el comportamiento de 34 pozos de explotación distribuidos en las ciudades de Linares y Hualahuis y una toma de agua superficial que sirve para el suministro de agua a Linares.

#### 7.5.2.1 Volumen extraído entre 2003 y 2007

La Figura 7.8 muestra la distribución de los pozos de extracción. El perímetro considerado para este análisis es el que corresponde a la situación presente (año 2009). Realizando un análisis comparativo entre la distribución poblacional (Figura 7.6) y la distribución de pozos (Figura 7.8) existe alta coincidencia, determinándose que la mayor densidad de pozos se encuentra en las zonas central y Este de la ciudad.



**Figura 7.8** Distribución de pozos de extracción

Los volúmenes de agua extraída con fines de abastecimiento a la población de Linares se presentan en la Tabla 7.2 y los volúmenes correspondientes a la ciudad de Hualahuises están mostrados en la Tabla 7.3.

**Tabla 7.2** Volumen extraído entre los años 2003-2007 en la ciudad de Linares (expresado en m<sup>3</sup>)

<b>Linares</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
<b>Enero</b>	675,340.01	583,242.97	623,305.12	662,057.28	525,295.15
<b>Febrero</b>	676,108.28	586,600.70	657,198.14	661,246.33	602,268.23
<b>Marzo</b>	642,777.24	593,265.48	662,407.49	571,495.68	511,731.68
<b>Abril</b>	605,889.94	525,030.96	662,407.49	643,842.09	566,519.68
<b>Mayo</b>	561,532.26	629,567.83	583,465.24	635,282.78	525,788.75
<b>Junio</b>	569,350.66	667,164.08	686,472.14	634,214.65	548,266.25
<b>Julio</b>	605,288.56	693,845.44	689,362.67	623,261.89	690,131.30
<b>Agosto</b>	651,571.83	723,425.98	588,209.69	708,332.89	755,585.57
<b>Septiembre</b>	572,732.35	665,971.95	753,561.71	580,776.19	625,757.58
<b>Octubre</b>	673,274.88	650,882.36	701,068.92	633,870.68	641,571.52
<b>Noviembre</b>	554,675.85	679,351.21	634,237.91	510,218.43	671,063.04
<b>Diciembre</b>	656,959.56	636,317.43	663,574.67	541,161.34	687,769.56

Linares presenta un consumo promedio anual de agua de 629,049.13 m<sup>3</sup> (periodo 2003-2007), su mínimo consumo mensual se registró en el mes de Noviembre de 2006 y su máximo consumo mensual se presentó en el mes de Agosto de 2007. El volumen total de agua extraída para el periodo de análisis es de 37,742,947.52 m<sup>3</sup>. El año que presentó la mayor extracción de agua fue el 2005 con un volumen acumulado de 7,905,271.18 m<sup>3</sup>. Se determinó un comportamiento errático de los volúmenes extraídos, presentándose una extracción ascendente entre 2003 a 2005, para los años 2006 y 2007 se tienen volúmenes menores al registrado en 2003.

**Tabla 7.3** Volumen extraído entre los años 2003-2007 en la ciudad de Hualahuises (expresado en m<sup>3</sup>)

<b>Hualahuises</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
<b>Enero</b>	21,203.84	31,385.64	49,511.64	38,653.11	39,356.38
<b>Febrero</b>	22,561.90	23,539.45	58,747.39	38,653.11	31,704.77
<b>Marzo</b>	37,216.17	45,424.17	43,514.44	39,994.85	18,058.48
<b>Abril</b>	78,041.66	37,071.71	43,514.44	53,643.11	37,785.25
<b>Mayo</b>	73,105.92	42,895.01	28,190.76	53,643.11	37,483.20
<b>Junio</b>	46,086.28	42,556.18	53,332.30	54,657.62	40,345.06
<b>Julio</b>	42,565.59	40,559.01	61,475.18	53,643.11	37,866.24
<b>Agosto</b>	36,497.15	48,005.31	34,537.40	45,313.63	35,261.57
<b>Septiembre</b>	26,703.36	44,488.45	35,469.50	44,957.95	36,782.78
<b>Octubre</b>	25,619.90	29,887.63	45,152.43	40,195.23	37,975.68
<b>Noviembre</b>	26,793.10	36,934.58	27,030.15	40,195.23	33,499.58
<b>Diciembre</b>	31,468.38	32,978.21	34,514.09	35,742.01	35,721.22

Los valores registrados para la ciudad de Hualahuises presentan un comportamiento también errático en los volúmenes totales extraídos (Tabla 7.3). El volumen total extraído para el periodo 2003 a 2007 es de 2,399,710.61 m<sup>3</sup>, con un promedio anual de extracción igual a 39,995.18 m<sup>3</sup>. El año con menor explotación es la gestión 2007 con 421,840.20 m<sup>3</sup> y el año con mayor explotación fue el 2006 con un volumen de 539,292.08 m<sup>3</sup>. En lo referido a las extracciones mensuales la menor extracción se presentó en el mes de Enero de 2003 (21,203.84 m<sup>3</sup>) y la mayor explotación de agua se registró en el mes de Julio de 2005 alcanzando los 61,475.18 m<sup>3</sup>, triplicando prácticamente el volumen extraído en el mes con menos consumo.

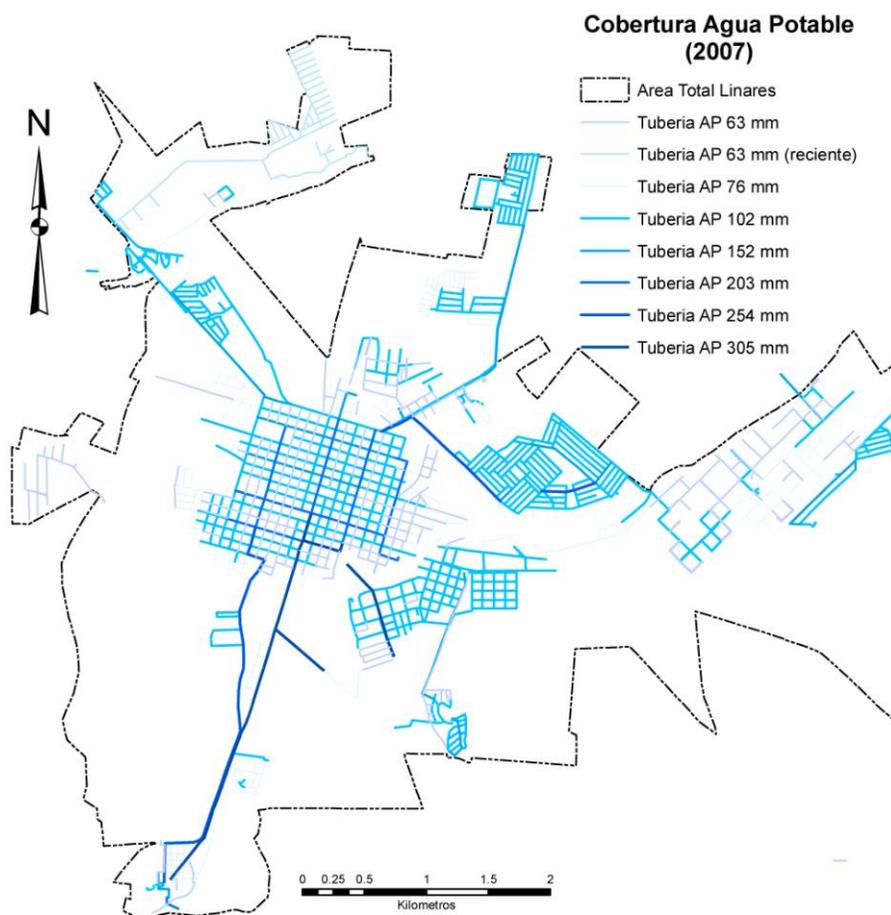
Cabe aclarar que los datos de las Tablas 7.2 y 7.3 son mediciones realizadas en boca de pozo, donde se registró las horas de bombeo y los caudales mensuales promedio, significando estos volúmenes la explotación directa de los recursos hídricos.

#### 7.5.2.2 Distribución de agua potable

La Figura 7.9 representa la cobertura del sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Linares con datos actualizados para el año 2007. Todos los valores fueron registrados en campo y posteriormente digitalizados y superpuestos a la cartografía urbana de la ciudad. En la Tabla 7.4 se muestran los volúmenes que pueden ser contenidos en los sistemas de distribución de agua potable y de alcantarillado sanitario (SADM, 2007).

**Tabla 7.4** Volumen que pueden contener los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario

Descripción	Diámetro (cm)	Longitud (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Tubería de Agua Potable	6.3	50,846.25	634.00
Tubería de Agua Potable	7.6	26,053.02	472.75
Tubería de Agua Potable	10.2	82,898.20	2,709.54
Tubería de Agua Potable	15.2	10,146.47	736.47
Tubería de Agua Potable	20.3	6,438.35	833.52
Tubería de Agua Potable	25.4	5,068.45	1,027.29
Tubería de Agua Potable	30.5	4,969.06	1,452.19
<b>Total</b>		<b>186,419.79</b>	<b>7,865.76</b>
Tubo de Alcantarillado	30.5	49,323.30	14,624.76
<b>Total</b>	<b>40% de sección</b>		<b>5,849.90</b>



**Figura 7.9** Sistema de distribución de agua potable en la ciudad de Linares

### 7.5.2.3 Volumen de consumo de usuarios entre 2003 y 2007

Para determinar el volumen total de consumo final de los pobladores de la ciudad de Linares se determinó el número de usuarios y los consumos finales de los mismos para las gestiones 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007, de esta forma es posible conocer la evolución en términos de uso de agua en el medio urbano de la ciudad.

La Tabla 7.5 demuestra que el número de usuarios en promedio se incrementó paulatinamente en el periodo de tiempo bajo análisis, una diferencia de 3211 nuevos usuarios entre los años 2003 y 2007 que representan un 22.22% del total registrado en 2003 (valores promedio). Para fines del 2007 un total de 18,086 usuarios disfrutaban de los servicios básicos de saneamiento.

**Tabla 7.5** Número total de usuarios en la ciudad de Linares gestiones 2003 a 2007

<b>Número total de usuarios</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
<i>Enero</i>	14,250	14,609	15,239	15,879	17,209
<i>Febrero</i>	14,282	14,639	15,276	15,972	17,267
<i>Marzo</i>	14,308	14,713	15,276	16,077	17,341
<i>Abril</i>	14,325	14,788	15,356	16,212	17,398
<i>Mayo</i>	14,351	14,810	15,490	16,306	17,497
<i>Junio</i>	14,392	14,871	15,570	16,461	17,611
<i>Julio</i>	14,443	14,914	15,642	16,598	17,727
<i>Agosto</i>	14,475	14,972	15,698	16,737	17,727
<i>Septiembre</i>	14,516	15,034	15,728	16,852	17,799
<i>Octubre</i>	14,540	15,066	15,756	16,942	17,892
<i>Noviembre</i>	14,558	15,112	15,791	17,029	18,005
<i>Diciembre</i>	14,593	15,163	15,833	17,121	18,086
<b>Promedio</b>	<b>14,419</b>	<b>14,891</b>	<b>15,555</b>	<b>16,516</b>	<b>17,630</b>

El volumen que los usuarios consumen, puede ser determinado por las lecturas de los medidores instalados en las residencias o propiedades de cada uno de los usuarios. En un sistema de distribución perfecto, el volumen de ingreso debe ser igual al volumen de consumo (salida) por los usuarios. La Tabla 7.6 presenta los valores de consumo final entre 2003-2007. Donde los volúmenes finales registrados presentan un comportamiento errático, siendo el año 2006 el año con mayor volumen igual a 3,461.543 m<sup>3</sup>, como valor promedio mensual se tiene 269,205.60 m<sup>3</sup>.

**Tabla 7.6** Volumen total de agua potable facturado para los años 2003-2007

<b>Volumen total facturado [m<sup>3</sup>]</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
<i>Enero</i>	243,479	270,916	272,394	270,233	258,965
<i>Febrero</i>	197,672	13,759	249,622	253,037	246,147
<i>Marzo</i>	230,491	251,716	226,335	262,237	258,687
<i>Abril</i>	228,774	249,791	270,332	269,248	277,634
<i>Mayo</i>	265,315	247,032	273,638	298,203	280,238
<i>Junio</i>	259,635	273,969	288,213	286,140	287,068
<i>Julio</i>	279,290	301,952	272,662	336,155	322,899
<i>Agosto</i>	288,294	284,164	306,809	302,198	303,423
<i>Septiembre</i>	274,541	306,053	300,485	345,366	315,138
<i>Octubre</i>	265,954	269,018	307,950	305,929	310,508
<i>Noviembre</i>	255,016	266,580	249,216	263,918	282,619
<i>Diciembre</i>	237,649	249,340	250,191	268,879	269,207
<b>Acumulado</b>	<b>3,026,110</b>	<b>2,984,290</b>	<b>3,267,847</b>	<b>3,461,543</b>	<b>3,412,533</b>
<b>Promedio</b>	<b>252,176</b>	<b>248,691</b>	<b>272,321</b>	<b>288,462</b>	<b>284,378</b>

La eficiencia del sistema y las pérdidas son mostradas en la Tabla 7.7 donde la gestión 2004 fue la más eficiente y el año 2006 fue el menos eficiente en términos de distribución de agua potable en la ciudad de Linares.

Tabla 7.7 Comparación volumen explotado y volumen entregado

Descripción	2003	2004	2005	2006	2007
Explotado	7,445,501.42	7,634,666.38	7,905,271.18	7,351,748.30	7,351,748.30
Facturado	3,026,110.00	2,984,290.00	3,267,847.00	3,461,543.00	3,412,533.00
<b>Eficiencia</b>	<b>59.36%</b>	<b>60.91%</b>	<b>58.66%</b>	<b>52.92%</b>	<b>53.58%</b>
<b>Máxima eficiencia</b>			<b>60.91%</b>		
<b>Máxima perdida</b>			<b>-47.08%</b>		

Para la determinación de los usos más importantes en Linares se analizó el destino final de cada usuario, estos datos son mostrados en la Tabla 7.8, los cuales presentan la situación entre 2003-2007.

Tabla 7.8 Clasificación de los usuarios de agua potable por actividad en la ciudad de Linares (2003-2007)

Clasificación de usuarios Mes	Uso Doméstico					Uso Comercial				
	2003	2004	2005	2006	2007	2003	2004	2005	2006	2007
Enero	13,662	13,763	14,309	14,895	16,172	360	573	611	655	694
Febrero	13,684	13,759	14,343	14,964	16,222	362	605	606	658	701
Marzo	13,715	13,830	14,357	15,068	16,295	357	605	591	659	700
Abril	13,729	13,904	14,423	15,202	16,350	355	606	604	659	698
Mayo	13,751	13,933	14,560	15,280	16,447	357	596	600	675	697
Junio	13,793	13,955	14,639	15,430	16,553	356	625	601	677	698
Julio	13,842	14,000	14,707	15,564	16,668	357	619	604	677	696
Agosto	13,874	14,059	14,761	15,695	16,734	357	618	605	684	695
Septiembre	13,901	14,111	14,778	15,806	16,782	357	618	613	688	698
Octubre	13,924	14,148	14,793	15,890	16,819	357	611	623	689	703
Noviembre	13,825	14,195	14,800	15,970	16,930	474	607	647	696	704
Diciembre	13,742	14,241	14,833	16,059	17,002	593	606	653	698	709
<b>Promedio</b>	<b>13,787</b>	<b>13,992</b>	<b>14,609</b>	<b>15,485</b>	<b>16,581</b>	<b>387</b>	<b>607</b>	<b>613</b>	<b>676</b>	<b>699</b>
<b>% Total</b>			<b>94.26%</b>					<b>3.75%</b>		

Continúa Tabla 7.8

CLASIFICACIÓN DE USUARIOS Mes	Uso Industrial					Uso Público					Uso por Clientes Pensionados				
	2003	2004	2005	2006	2007	2003	2004	2005	2006	2007	2003	2004	2005	2006	2007
Enero	6	6	4	10	10	42	46	50	57	59	180	221	265	282	295
Febrero	5	6	4	10	10	42	48	50	57	60	189	221	273	283	296
Marzo	5	6	4	10	10	42	49	50	57	61	189	223	274	283	296
Abril	5	6	4	10	10	42	49	51	58	61	194	223	274	283	300
Mayo	5	5	4	10	10	44	48	51	58	61	194	228	275	283	303
Junio	5	5	4	10	10	44	49	51	58	61	194	237	275	286	310
Julio	6	5	4	10	10	44	50	52	58	61	194	240	275	289	313
Agosto	6	5	4	10	10	44	50	53	59	61	194	240	275	289	320
Septiembre	6	5	9	10	10	45	49	53	59	61	207	251	275	289	321
Octubre	6	5	9	10	10	46	49	54	59	61	207	253	277	294	321
Noviembre	6	5	10	10	10	46	49	57	59	61	207	255	277	294	321
Diciembre	6	5	10	10	10	46	50	57	59	61	206	261	280	295	325
<b>Promedio</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>44</b>	<b>49</b>	<b>52</b>	<b>58</b>	<b>61</b>	<b>196</b>	<b>238</b>	<b>275</b>	<b>288</b>	<b>310</b>
<b>% Total</b>			<b>0.05%</b>					<b>0.33%</b>					<b>1.64%</b>		

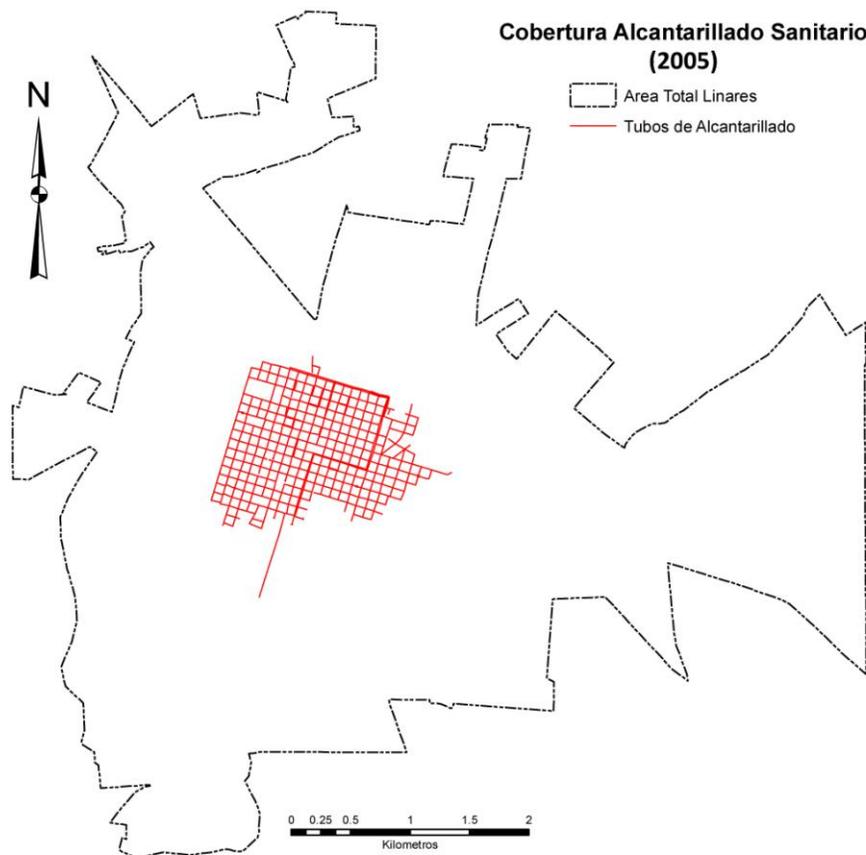
Los resultados del análisis de usuarios revelan que el uso más importante por amplio margen es el doméstico (94.26%), el segundo uso más importante es el comercial (3.75%), el tercer uso por orden de jerarquía es el destinado a pensionados (1.64%), el uso público (0.33%) es el cuarto en este ranking, finalmente el uso industrial es el menos significativo en esta clasificación (0.05%). Cabe aclarar que la mayor parte de las industrias tienen pozos propios de abastecimiento de los cuales no se tiene documentación alguna.

#### 7.5.2.4 Recolección de aguas servidas

Una de las actividades prioritarias que genera el desarrollo urbano es la emisión de aguas residuales de diverso índole (residencial, industrial, municipal principalmente). La Figura 7.10 muestra la cobertura del sistema de alcantarillado sanitario de la Ciudad de Linares para el año 2005. La longitud total calculada para este año es de 49,323.30 m, asumiendo un promedio de tubería de 12" se tendría la capacidad de transportar 14,624.76 m<sup>3</sup> de aguas servidas a tubo lleno, pero como este sistema no trabaja bajo presión, se asume que un 40% de la sección permite su funcionamiento eficiente y por gravedad, lo cual nos representaría un volumen transportado de ~5,850 m<sup>3</sup> como valor promedio al mes (Tabla 7.4).

La cobertura de los servicios básicos también fue analizada, determinándose el siguiente comportamiento para los años 2003 al 2007 en Linares (Tabla 7.9). Al igual que en el caso del sistema de distribución de agua potable, la cobertura de los servicios de recolección de aguas residuales se incrementó.

Un 89.25% de las residencias en Linares goza de agua potable y alcantarillado, el 10.64% tiene acceso a agua potable y no a alcantarillado y finalmente solo el 0.13% tiene acceso a alcantarillado y no disfruta del servicio de agua potable, cabe aclarar que estos datos son referidos a las viviendas legalmente establecidas y bajo registro en el sistema de la institución responsable de brindar estos servicios (Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey).



**Figura 7.10** Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario en la ciudad de Linares. Digitalización de plano de cobertura SADM (2007)

**Tabla 7.9** Cobertura de servicios básicos en la ciudad de Linares

Cobertura de servicios a los usuarios	Drenaje					Agua Potable				
	2003	2004	2005	2006	2007	2003	2004	2005	2006	2007
<i>Enero</i>	20	18	20	20	21	2,119	2,154	2,134	792	898
<i>Febrero</i>	19	18	19	20	22	2,118	2,156	2,134	856	899
<i>Marzo</i>	18	18	19	20	21	2,118	2,157	2,132	877	902
<i>Abril</i>	19	20	19	20	21	2,117	2,155	2,131	872	901
<i>Mayo</i>	18	19	19	21	21	2,127	2,147	2,132	881	902
<i>Junio</i>	18	20	20	22	21	2,134	2,145	2,125	894	904
<i>Julio</i>	18	21	20	22	21	2,143	2,149	2,122	893	908
<i>Agosto</i>	18	20	20	21	21	2,148	2,144	2,122	893	908
<i>Septiembre</i>	18	22	20	20	21	2,151	2,152	2,117	888	907
<i>Octubre</i>	19	22	20	21	22	2,155	2,141	2,122	887	910
<i>Noviembre</i>	19	21	20	21	21	2,155	2,139	2,127	887	912
<i>Diciembre</i>	19	21	20	21	21	2,156	2,137	1,866	897	913
<b>Promedio</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>2,137</b>	<b>2,148</b>	<b>2,105</b>	<b>876</b>	<b>905</b>
<b>% Parcial</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.12%</b>	<b>14.82%</b>	<b>14.42%</b>	<b>13.54%</b>	<b>5.31%</b>	<b>5.14%</b>
<b>% Total</b>			<b>0.13%</b>					<b>10.64%</b>		

Continúa Tabla 7.9

Cobertura de servicios a los usuarios		Agua y Drenaje				
Mes	2003	2004	2005	2006	2007	
Enero	12,111	12,437	13,085	15,067	16,311	
Febrero	12,145	12,465	13,123	15,096	16,368	
Marzo	12,172	12,538	13,125	15,180	16,439	
Abril	12,189	12,613	13,206	15,320	16,497	
Mayo	12,206	12,644	13,339	15,404	16,595	
Junio	12,240	12,706	13,425	15,545	16,707	
Julio	12,282	12,744	13,500	15,683	16,819	
Agosto	12,309	12,808	13,556	15,823	16,819	
Septiembre	12,347	12,860	13,591	15,944	16,892	
Octubre	12,366	12,903	13,614	16,034	16,982	
Noviembre	12,384	12,952	13,644	16,121	17,093	
Diciembre	12,418	13,005	13,947	16,203	17,173	
<b>Promedio</b>	12,264	12,723	13,430	15,618	16,725	
<b>% Parcial</b>	<b>85.05%</b>	<b>85.44%</b>	<b>86.34%</b>	<b>94.57%</b>	<b>94.86%</b>	
<b>% Total</b>	<b>89.25%</b>					

### 7.5.3 Comportamiento del nivel freático entre 2003 y 2007

Para conocer el comportamiento del nivel del AS, se analizó las mediciones realizadas en los pozos de extracción de agua, se presentan 3 pozos tipo aleatoriamente seleccionados. El pozo WTP-168 (WTP-168\_3 corresponde al año 2003 y así sucesivamente), tiene un comportamiento muy variable, donde las profundidades máximas del NF son de ~35 m (Jun-2003) y las mínimas de ~11 m (Dic-2003), (Figura 7.11).

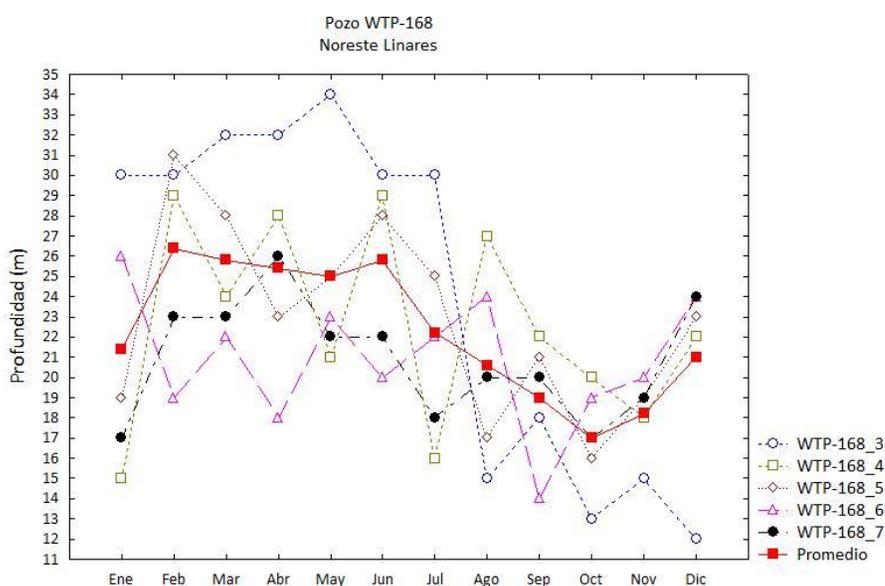
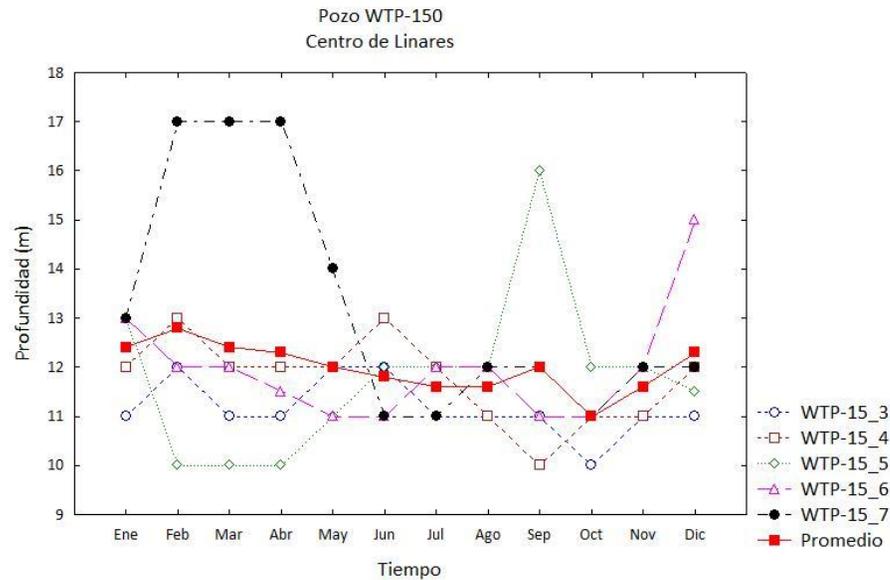


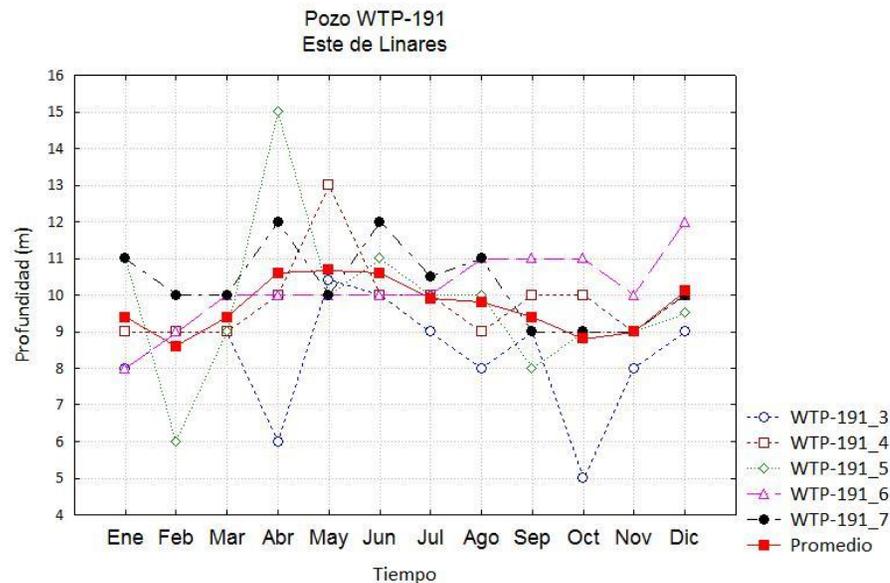
Figura 7.11 Variación del nivel freático entre 2003-2007, pozo en el noreste de Linares.

En general mayores profundidades de extracción en épocas cálidas (Feb-Jul), en tanto que para las épocas frías se tiene un ascenso del NF (Sep-Ene), análisis de valores promedio (línea roja).



**Figura 7.12** Variación del nivel freático entre 2003-2007 pozo en el centro de Linares

La Figura 7.12 (Pozo WTP-150; WTP-150\_3 corresponde al año 2003 y así sucesivamente) presenta un comportamiento más homogéneo, donde los valores más profundos de extracción oscilan entre 15 y 13 m (Abr-2005; May-2004), su valor más somero alcanzó 5 m de profundidad en Oct-2003. Sus valores promedio para los 5 años de análisis oscilan entre 11 a 13 m.



**Figura 7.13** Variación del nivel freático entre 2003-2007 pozo en al este de Linares

El pozo WTP-191 (Figura 7.13) muestra un comportamiento muy variado, donde se tiene diferencias significativas entre los NFs medidos, alcanzando una diferencia de ~10 m entre la mayor profundidad ~15 m (Abr-2005) y menor profundidad de ~5 m (Oct-2003), los valores promedio oscilan entre ~8.5 a ~11 m.

Como se puede ver, los NFs tienen un comportamiento muy variable, en tres pozos ejemplo, existe una diferencia de ~7m (WTP-150) a ~10 m (WTP-168 y 191), lo cual demuestra un comportamiento afectado por las variaciones climatológicas, pero principalmente por los volúmenes extraídos, como se puede determinar en el caso del pozo WTP-168 donde existe una diferencia de ~24 m del NF en el año 2003, situación que por causas naturales no es probable.

Aparentemente, la zona donde se localiza el pozo WTP-168 sufrió un descenso marcado del NF, debido a que sus valores promedio tienen una profundidad entre 20 y 22 m, mientras que para los pozos WTP-150 y 191 sus promedios de profundidad del NF se encuentran entre los 9 y 12 metros, la mayor homogeneidad en los valores registrados en los dos pozos (WTP-150 y 191) indica que no existe un descenso marcado por causa de explotación local excesiva, como es el caso del pozo WTP-168.

#### **7.5.4 Calidad del agua subterránea de 1981 a 2009**

A modo de resumen general la Figura 7.14 muestra la distribución de la calidad del AS en la región por medio del diagrama de Piper, para muestras colectadas entre 1981 y 2009, de manera clara se evidencia la evolución en la química del AS, las muestras del área urbana de Linares fueron registradas entre los años 2000 y 2007, las cuales presentan una calidad química similar concentrándose en el lugar donde se presenta mayor densidad de muestras (ovalado rojo). Esta zona corresponde a aguas con presencia mayoritaria de Ca, Mg, Na, Cl, SO<sub>3</sub> (iones mayores), lo cual significa aguas mineralizadas naturalmente o con química modificada por compuestos químicos introducidos al sistema. La presencia de calcio, magnesio y sodio, responde a la evolución natural del agua debido a la interacción agua roca, los niveles altos de cloruros y principalmente sulfatos, son indicadores de influencia antropogénica y de posible contaminación debido a las actividades desarrolladas en la ciudad de Linares y sus alrededores.

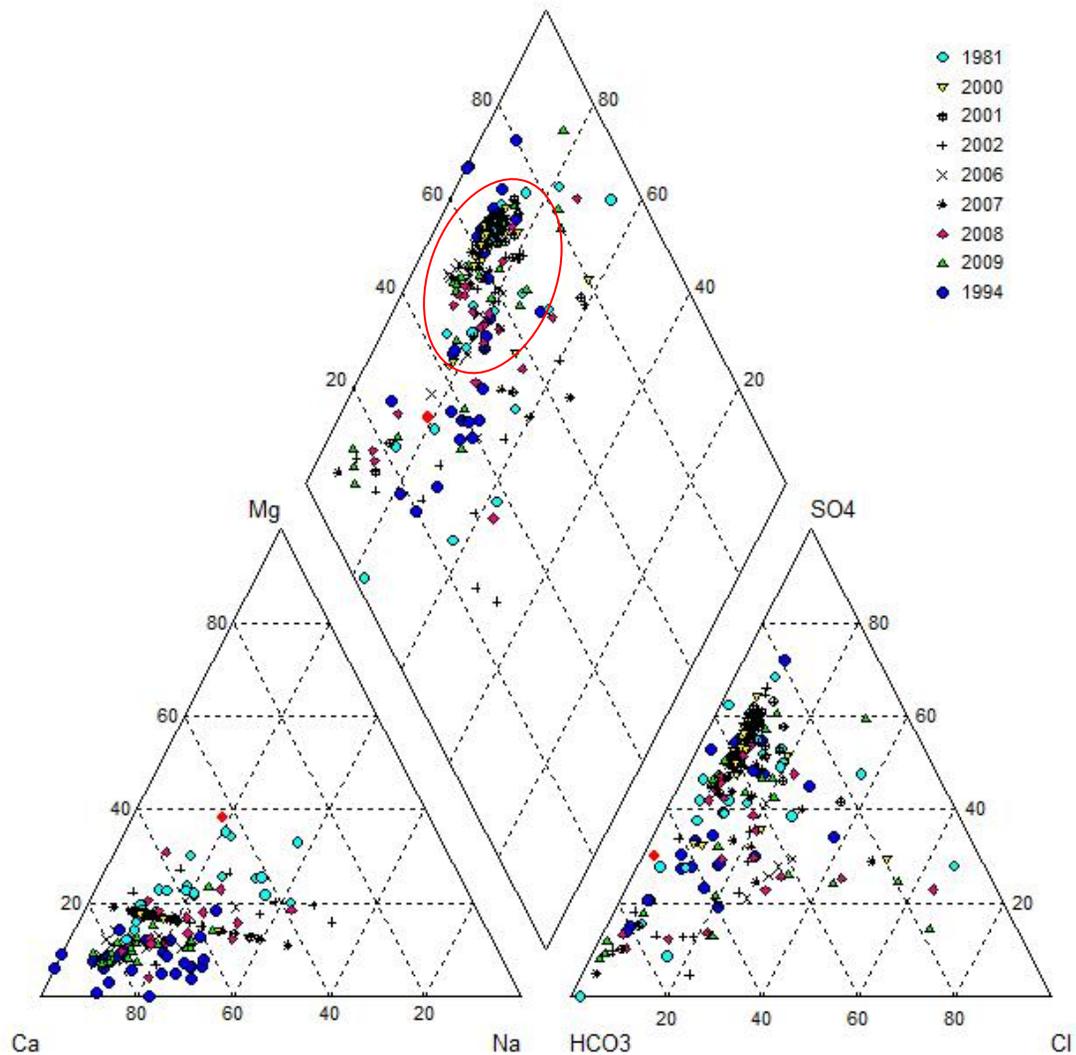


Figura 7.14 Diagrama de Piper para el total de las muestras de la base de Datos 1981-2009

### 7.5.5 Posibles fuentes contaminantes

Debido a que no se tuvo acceso a una base de datos de catastro urbano a detalle, tampoco se tiene acceso a los efluentes vertidos por las industrias y a muestras de aguas residuales del sistema de recolección de aguas servidas en el área de estudio, no fue posible determinar las fuentes puntuales de posible contaminación del AS.

Pero si es posible inducir algunas fuentes difusas de contaminación respaldados en la literatura revisada y la base de datos hidrogeoquímicos y la base digital de usos de suelo, el objetivo de esta determinación a priori es el de tener una imagen más clara del posible impacto de los seres humanos y sus actividades en el entorno natural de AS.

Claramente el alto contenido de sulfatos y nitratos son evidencia de la modificación de la química del AS producida por el uso sin restricción de fertilizantes y pesticidas en las zonas periurbanas de Linares (zonas destinadas a actividades agrícolas), otra posible fuente son las fugas del sistema de alcantarillado sanitario dentro del área urbana de Linares, de los cuales no se tiene información alguna.



**Figura 7.15** Áreas de cultivo colindantes a la ciudad de Linares (**Fuente:** Héctor De León Gómez).

La presencia de metales en algunas muestras, ubicadas al noreste de Linares, podrían deberse a efluentes que contengan estos iones en los efluentes vertidos por las industrias ubicadas en el sector industrial de Linares. Una fuente alterna pueden ser los depósitos de chatarra distribuidos al interior de la ciudad, los cuales no tienen ningún control ni protección en su almacenamiento ni por parte de las autoridades municipales. Los depósitos de minerales como barita al aire libre también pueden afectar significativamente la calidad del agua subterránea.

La presencia de otros contaminantes especiales es posible debido a que los materiales de desecho hospitalario no se gestionan adecuadamente y son vertidos de manera indiscriminada en botaderos clandestinos, los tanques de almacenamiento de gasolineras y de estaciones de servicio, así como de talleres de reparación mecánica no están registrados, ni gestionados y menos controlados por las autoridades ambientales y municipales, constituyéndose en potenciales fuentes contaminantes.



Figura 7.16 Posibles fuentes de contaminación en el área urbana de Linares.



Continuación figura 7.16.



Continuación Figura 7.16.

### 7.5.6 Propuestas de gestión del agua subterránea

De acuerdo a los datos recopilados en la presente investigación, es evidente que se tiene una situación compleja donde muchos factores están interconectados e involucrados, esta problemática debe ser enfrentada con una política integral, de esta forma será posible brindar soluciones y permitir el desarrollo económico, social y sostenible de la ciudad de Linares, algunas políticas de gestión, desde el punto de visto hidrogeológico urbano, que podrían ser aplicadas son:

- a) Determinar los volúmenes requeridos por las actividades desarrolladas, en orden de importancia de acuerdo a lo evidenciado en la Tabla 7.8 y en concordancia con la distribución poblacional (Figuras 7.6 y 7.7 y Tabla 7.1), que permita realizar una zonificación de la demanda de agua.
- b) Debe de planificarse la explotación de AS en todos los pozos de extracción de manera responsable considerando el uso final y la población a ser abastecida.
- c) Debe pretenderse estandarizar los volúmenes de explotación y controlar los niveles freáticos en toda el área urbana, evitando en lo posible la presencia de conos de depresión marcados.
- d) Es necesario actualizar el catastro urbano para definir los usos de suelo y su actividad para determinar su necesidad de servicios básicos y crear un catalogo de actividades y sus posibles impactos en el sistema acuífero.
- e) Es primordial controlar la calidad química del AS de manera periódica, que permita la identificación temprana de contaminantes, de esta manera se facilitará la tarea de identificación de fuentes contaminantes.
- f) Debe planificarse el uso de suelos debido a que tienen una relación directa con la cantidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos y superficiales.
- g) Los sistemas de saneamiento básico deben cubrir toda el área urbana, los tratamientos de dichos efluentes también deben de ser controlados eficientemente.
- h) Se debe limitar el hacinamiento residencial en espacios reducidos y con alta densidad poblacional, que requieren mayores volúmenes de agua para su subsistencia.

## 7.6 CONCLUSIONES

La concentración humana en áreas reducidas, producidas por la búsqueda de oportunidades de crecimiento económico y condiciones de vida más confortables, tiene como consecuencia la modificación de los sistemas naturales. La constante y creciente demanda de agua de las ciudades y sus alrededores, provoca la explotación del AS en condiciones particulares y con nuevos procesos de interacción entre la infraestructura urbana, los acuíferos y las actividades antropogénicas, que comúnmente derivan en serios problemas ambientales.

Como una necesidad urgente de conocer el origen, procesos y consecuencias, así como brindar soluciones adecuadas a estos problemas, emerge una nueva rama científica denominada *Hidrogeología Urbana* que se desprende de la Hidrogeología tradicional.

El desarrollo de las áreas urbanas afecta significativamente el ciclo hidrológico natural, el principal factor de cambio es el proceso de urbanización que evoluciona en varias etapas en el desarrollo de una ciudad, cada etapa afecta de manera particular y significativa a los acuíferos.

El proceso de recarga se modifica principalmente por la impermeabilización de la superficie, debido a la urbanización, por esta razón, se produce una recarga indirecta, que es más difícil de cuantificar debido a que: se tiene menos experiencia para estimar los componentes y la existencia de diferentes fuentes a ser consideradas en el sistema, como ser: infiltración en grietas, sumideros de agua pluvial, filtración de pozos negros, estanques, letrinas y red de alcantarillado y fugas del sistema de suministro.

La cuantificación detallada de los procesos de infiltración en áreas urbanas es imposible debido a la falta de datos, la gran variabilidad y la extrema no linealidad de las propiedades hidráulicas de los sedimentos en la zona no saturada. La aplicabilidad y flexibilidad de los balances aproximados son útiles para evaluar la recarga, también se puede utilizar trazadores como herramientas en la determinación de la recarga de los acuíferos.

Los sistemas de flujo del AS se ven modificados en el subsuelo de las ciudades, debido a la presencia de estructuras enterradas que interactúan con el flujo, la infiltración de agua de diferentes fuentes subsuperficiales modifica las condiciones hidrodinámicas (diferencia de presiones y cargas hidráulicas) del AS, así como los elevados índices de explotación presentes en áreas urbanas.

La sobreexplotación de AS es la consecuencia lógica de una densidad poblacional alta, originando a su vez serios problemas de calidad y cantidad en el agua almacenada en los acuíferos. Los principales problemas ligados a este son: descenso y ascenso del NF a lo largo del tiempo, subsidencia de terrenos e intrusión de aguas de mar.

El NF puede descender drásticamente si se producen explotaciones no controladas, reduciendo el recurso y abatiendo la superficie de la zona saturada pudiendo llegar a invertir la dirección de flujo regional, lo cual produce cambios en la presión de poro del subsuelo reduciendo así su capacidad de resistir cargas verticales, en áreas costeras se corre el riesgo de intrusiones marinas hacia las fuentes de agua dulce bajo las urbes.

El análisis de la contaminación del AS es complicado debido al gran número de potenciales fuentes y la gran variedad de contaminantes que se puede encontrar en las ciudades. Los principales contaminantes son: a) aguas residuales; b) fertilizantes y pesticidas; c) compuestos volátiles orgánicos; d) hidrocarburos y sus derivados; e) metales pesados y compuestos especiales, y otros. Las fuentes más comunes de contaminantes son: a) derrames en sitios industriales; b) disposición y almacenamiento de vertidos enterrados y rellenos sanitarios; c) áreas de cultivo, jardines e invernaderos; d) fugas de alcantarillado, pozos negros y tanques sépticos; e) derrames durante el transporte de compuestos químicos.

Una gestión inteligente debe tener claro que el AS es un recurso limitado, por tanto debe indagarse su aprovechamiento sostenible, su objetivo debe ser proteger, utilizar, reciclar y verter el agua en condiciones ambientalmente satisfactorias, procurando su disponibilidad a las futuras generaciones, además debe involucrar políticas públicas, decisiones sociales y tecnologías limpias.

Las prácticas de gestión desarrolladas hasta ahora son: reducción de la extracción, reciclaje de aguas residuales, subsidio para la optimización de sistemas de riego, determinación de la vulnerabilidad de acuíferos, limitación de áreas con alta densidad de viviendas, controlar la ubicación de tiraderos y rellenos sanitarios, restringir la eliminación de efluentes industriales, introducir medidas especiales en el manejo de compuestos químicos y sus efluentes, planificación de la red de saneamiento y ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales y muchos otros.

El estudio de AS en zonas urbanas está motivado por su gran interrelación con el desarrollo socioeconómico y urbanístico de la ciudad. La protección del AS urbana, requiere de un marco integrado que implica el uso de modelos específicos que puedan ser entendidos por autoridades y planificadores urbanos. Esto alentaría a los administradores de la ciudad a reconocer el AS como un componente clave en el proceso de planeación y desarrollo urbano.

A pesar de ser costoso y tedioso, desarrollar sistemas de información es la mejor forma de gestionar los recursos del AS, prevenir la contaminación y generar el uso sostenible, permitiendo fácil acceso y visualización de los datos del AS para evaluar los impactos ambientales y realizar ajustes en tiempo real.

La ciudad de Linares presenta una situación complicada, debido a que se tiene una explotación de recursos hídricos excesiva, casi el 40% del volumen anual extraído se pierde desde el momento de la extracción hasta su disposición en cada una de las viviendas de los usuarios.

La variación del nivel freático al interior del área urbana es significativo (~10 m en promedio), hecho que demuestra la inexistencia de un plan de explotación apropiado, realizándose dicha actividad de manera imprevista y aparentemente para “salvar la emergencia del momento”.

Linares no cuenta con una base de datos hidrogeológicos que permita la gestión del recurso de manera eficiente y acorde a las necesidades de su población.

La calidad hidrogeoquímica del AS en la ciudad varía significativamente en comparación a la calidad del agua en las zonas de recarga de la cuenca (~50 km), pero aun más importante es la gran variación de la calidad química en aguas abajo respecto a la ubicación de la ciudad (entre 5 a 10 km), lo cual induce a sospechar que las actividades desarrolladas en Linares están generando contaminantes que interactúan con el AS.

El crecimiento físico y poblacional acelerado de la ciudad demanda una gestión adecuada de los sistemas de abastecimiento y desecho del agua. La calidad química entregada a la población depende básicamente del pozo de abastecimiento, realidad que pone en riesgo constante la salud pública de los habitantes de Linares debido a que no se tiene un tratamiento estandarizado en todos los pozos de extracción.

No se tiene un control de los volúmenes explotados destinados al riego de importantes áreas agrícolas (producción citrícola tradicional), lo cual impide realizar un balance hídrico real en la zona. Presumiblemente se realiza una sobreexplotación generalizada, una forma adecuada de gestionar el recurso puede ser realizar análisis particular de las micro-cuencas hidrológicas de la zona.

Presumiblemente el uso de suelo está directamente ligado a la calidad hidrogeoquímica del AS, la cual presenta variaciones importantes dependiendo de su punto de extracción.

## 8. PLANIFICACIÓN TERRITORIAL SOSTENIBLE

### 8.1 INTRODUCCIÓN

Como resultado de la evolución de la actual sociedad, el aumento en la producción de residuos de diversa índole (sólidos, líquidos y gaseosos) es uno de los problemas más apremiantes que enfrenta el medio ambiente (Mena-Frau *et al.*, 2006).

El concepto de sostenibilidad se ha aplicado en un sentido muy amplio, desde la protección del medio ambiente, la cohesión social, el crecimiento económico, el diseño de los vecindarios, el uso de las energías alternativas, el diseño de construcción verde y muchas otras aplicaciones (Priemus, 2005).

En lo referente a la planificación, la sostenibilidad incluye diversos objetivos como la minimización de la contaminación, las oportunidades de recreación al aire libre, la preservación de los paisajes y valores culturales, contribuyendo a los objetivos sociales destinados a prolongar la supervivencia de la humanidad a largo plazo (Kropp, 2010).

El entendimiento moderno del concepto de sostenibilidad esta caracterizado por un conflicto al momento de definir y cuantificar la sostenibilidad y sus objetivos. El principio fundamental de la sostenibilidad es que la humanidad viva en armonía con la naturaleza y en sociedad en concordancia con sus raíces cimentadas en creencias religiosas y en tradiciones culturales, que representan la voz de la naturaleza a la humanidad (Membratu, 1998).

El incremento de los requerimientos de los humanos y las actividades socioeconómicas imponen una presión cada vez mayor en los recursos de la tierra (espacio físico) creando así una competencia y generando conflicto en sus usos, que a su vez crea una subutilización de muchas zonas. Resolver problemas y tomar decisiones sobre el uso sostenible de la tierra como recurso, demanda la integración de datos y el conocimiento de un amplio espectro de disciplinas (Laskar, 2003).

La importancia de la gestión sostenible de los recursos de la tierra es debidamente reconocida por la comunidad mundial y la gravedad del problema puede juzgarse por el hecho de que en 1992 las Naciones Unidas dedican por completo el Capítulo 10 de su Programa 21 referido a

la evaluación de los recursos territoriales, a su gestión y su planificación que es un componente importante del análisis de la sostenibilidad en todo el mundo (Hall *et al.*, 2000; UNCED, 1992).

La planificación del uso del suelo es ampliamente aceptado, ya que la planificación de recursos de la tierra debe ser considerada como un proceso de toma de decisiones que "facilita la asignación de tierras a los usos que proporcionan mayores beneficios sostenibles" (UNCED, 1992).

La administración del territorio (espacio de terreno) es una de las tareas más importantes en el desarrollo humano, la cual enfrenta problemas serios como la definición del medio espacial, la selección de sitios industriales y asignación de usos de suelo son desafíos multifacéticos por naturaleza e implican requerimientos técnicos, económicos, sociales, ambientales y políticos. Las soluciones a estos desafíos frecuentemente involucran gran complejidad en el análisis espacial dentro del proceso para la toma de decisiones (Eldrandaly *et al.*, 2005).

Las tecnologías informáticas innovadoras y eficientes permiten la recolección sistemática y la distribución oportuna de los datos. Sin embargo, la transformación de los datos disponibles en información útil, pero solo el conocimiento e intervención humana pueden agregar valores a fin de dar sentido a los números en el uso del suelo. Para abordar un tema tan complejo con un enfoque sistemático para la toma de decisiones se requiere dar cabida a la multiplicidad y la multidimensionalidad del problema (Laskar, 2003).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido descritos como una tecnología que coadyuva a la toma de decisiones, porque muchas de sus aplicaciones proveen la información necesaria en muchas áreas incluyendo la gestión de recursos, la contaminación ambiental y el control de riesgos (Jankowski, 1995). Por otra parte, la optimización de las capacidades descriptivas y predictivas de los SIG a través de la integración con otros modelos analíticos especializados o modelos ambientales y socioeconómicos orientados a optimizar el análisis para tomar decisiones son innovaciones tecnológicas que permiten la investigación de la sostenibilidad de las actividades antropogénicas (Dangermond, 1987; Goodchild, 1987).

Durante los últimos años, se ha utilizado metodologías matemáticas como los Criterios Múltiples de Decisión (CMD) para la toma de decisiones por su utilidad en la selección de la mejor alternativa de todas las alternativas factibles bajo la presencia de diferentes criterios de selección y a las prioridades de criterio realizadas por los responsables de tomar decisiones (Jankowski, 1995).

Para investigar este problema complejo, los SIG y los CMD se utilizan siendo herramientas necesarias para realizar este tipo de análisis, la integración de estas herramientas tecnológicas es trascendental para poder alcanzar la solución más adecuada y sostenible del entorno analizado (Eldrandaly *et al.*, 2005).

El objetivo de este capítulo es explorar los potenciales de los métodos la decisión multicriterio para la planificación del uso de suelo. En el proceso de investigación se enfoca a desarrollar una metodología para la asignación óptima del uso de suelo mediante la integración de técnicas de decisión multicriterio en una plataforma SIG.

## 8.2 DESARROLLO SOSTENIBLE INTEGRANDO EL AGUA SUBTERRÁNEA, LOS USOS DE SUELO Y LAS NECESIDADES DE LA SOCIEDAD

La comisión de Brundtland creó un movimiento sinérgico con la introducción del término moderno de *Desarrollo Sostenible (DS)*, el cual tiene un modelo de tres pilares fundamentales (ambiental, económico y social), este modelo es el más comúnmente utilizado para enfrentar el paradigma de lograr el DS de las diversas actividades antropogénicas (Hodge, 2001; Wheeler, 2000).

Se reconoce que la empresa más importante del DS es la gestión y la toma de decisiones. El DS solo es posible si los tres pilares fundamentales interactúan armónicamente. Por regla general, el cosmos humano (social y económico) depende del cosmos abiótico y biótico para lograr su desarrollo y crecimiento social y económico. De acuerdo a la convención de Rio de Janeiro (1992) el pilar ambiental debe estar enfocado en la protección de la atmósfera, de la deforestación, de la desertificación, de la biodiversidad, de las fuentes de agua dulce y del efecto de los residuos peligrosos entre otros (Hodge, 2001; Kropp, 2010; Parris y Kates, 2003).

La evaluación del DS se define a través de la evaluación de los criterios o conjunto de criterios que intervienen en el medio analizado, se reconocen dos cuestiones importantes en el proceso de evaluación. El primer problema es elegir el *objetivo principal* de la evaluación y el segundo problema es *establecer el rendimiento* en el logro de ese objetivo. Estos problemas complican la capacidad de la humanidad de diseñar planes para avanzar hacia la sostenibilidad (Brandon y Lombardi, 2005; Kropp, 2010).

Los objetivos principales son amplios, pero deben de tener consideraciones específicas sobre las principales categorías de lo que debe de mantenerse y lo que se debe modificar para alcanzar el desarrollo (Parris y Kates, 2003). La elección de los objetivos es muy importante ya que determina como se juzga la sostenibilidad. Una de las características más notables del DS a largo plazo, es que puede significar tantas cosas diferentes a diferentes personas, donde las definiciones de un grupo a menudo se consideran no satisfactorias por otro grupo (Robinson, 2004).

La creación de métodos para medir el rendimiento hacia o desde los diversos objetivos se realiza con el uso de indicadores, lo que se definen como "las medidas cuantitativas seleccionadas

para evaluar el progreso hacia un objetivo” (Parris y Kates, 2003). Los indicadores pueden ser divididos en dos grupos principales: el índice único agregado, y el conjunto de indicadores (Mitchell, 1996). El primero reporta solo una variable, mientras que el segundo reporta varias variables.

El principal objetivo de cualquier conjunto de indicadores debe ser obtener un equilibrio entre lo local y lo global (Brandon y Lombardi, 2005). Debe ser posible identificar un conjunto básico de variables que sea aplicable a cualquier comunidad con problemas locales y/o globales. Brandon y Lombardi listan las características esenciales de los buenos indicadores de sostenibilidad: a) deben ser relevantes y se deben adaptar al propósito para el cual están destinados; b) deben ser confiables para que la información que el indicador está proporcionando sea respetada; c) deben ser fáciles de entender incluso por los inexpertos en la materia y d) deben basarse en el acceso a los datos de para que la información esté disponible mientras todavía se tenga tiempo para actuar (Brandon y Lombardi, 2005).

Los modelos de DS más actuales de calificación de sostenibilidad son el LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) desarrollado por el United States Green Building Council (USGBC) y sistemas de SSI (Sustainable Sites Initiative) desarrollado por American Society of Landscape Architects (ASLA); cada uno evalúa la sostenibilidad sobre la base de las características espaciales, por ejemplo el uso del suelo, la distancia a los servicios comunitarios, y tipo de suelo. Aplicando estos criterios espaciales se puede ganar una mejor imagen de la distribución espacial del DS (Kropp, 2010).

Un sistema optimizado permitiría asignarle pesos de importancia a estos criterios específicos en lugar de hacer hincapié en los criterios de significado para la evaluación del DS. Un sistema útil admitiría una visión del entorno de manera gráfica y analítica. Para trabajar con estos complejos aspectos de la sostenibilidad los CMD proporcionan un sistema robusto que puede hacer frente a muchos criterios ponderados e interrelacionados (Kropp, 2010).

### 8.2.1 Análisis conceptual del Desarrollo Sostenible

El concepto de DS no es claro y "sigue siendo un tema confuso" y "lleno de contradicciones". El proceso de análisis evidencia siete conceptos que, juntos, arman el marco teórico del "Desarrollo Sostenible", cada concepto representa significados distintos del marco teórico y son (Jabareen, 2008):

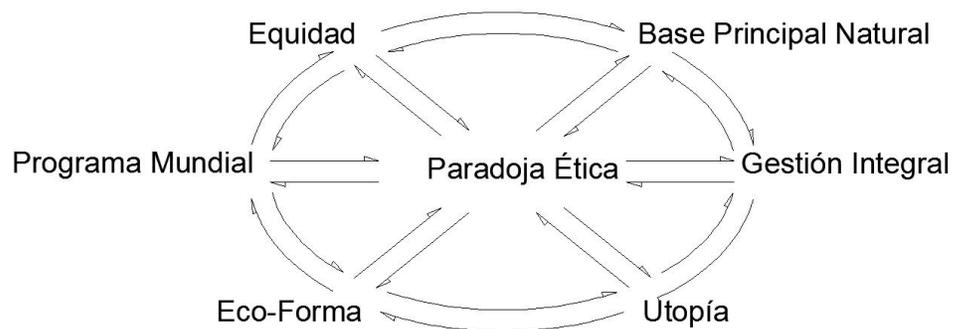
- a) El concepto de la “Paradoja ética”: La *sostenibilidad* es vista como una característica del proceso o estado que puede mantenerse indefinidamente. Por otro lado, el *desarrollo*

representa la modificación del medio ambiente, lo que requiere intervención profunda en la naturaleza y agota los recursos naturales.

- b) El concepto de “Reserva del Capital Natural”: El término de "Capital Natural" fué popularizado por Pearce y Turner (1990) y Pearce, Barbier y Markandya (1990), quienes definen el stock de capital natural como "el stock de bienes de todos los recursos ambientales y naturales, desde el petróleo en el suelo a la calidad del suelo y el agua subterránea, desde el stock de peces en el océano a la capacidad del globo terráqueo para reciclar y absorber carbono " (Pearce *et al.*, 1990; Pearce y Turner, 1990). Incluye todos los recursos renovables y no renovables, los cuales no pueden ser creados por el ser humano (Roseland, 2000).
- c) El concepto de “Equidad”: representa el aspecto social del desarrollo sostenible, Haughton (1999) sostiene que "la dimensión social es fundamental ya que una sociedad injusta es poco probable que sea sostenible en el medio ambiente o en las condiciones económicas a largo plazo" (Haughton, 1999). Muchos académicos, ambientalistas y gobiernos concuerdan en que la sostenibilidad se podría lograr a través del equilibrio eficaz de los objetivos sociales, ambientales y económicos (Berke y Kartez, 1995; Healey y Shaw, 1993).
- d) El concepto de “Eco-forma”: representa la forma deseada y el diseño ecológico del hábitat humano, como los espacios urbanos, edificios y casas. La literatura urbana sugiere que la sostenibilidad se podría lograr si la planificación responsable se llevara a cabo a escala local y regional (Jabareen, 2008).
- e) El concepto de “Gestión integral”: representa la visión de DS de los aspectos del desarrollo social, el crecimiento económico y la protección del medio ambiente en la planificación y gestión para el DS que ha recibido una atención considerable en los últimos años (CSD, 2001).
- f) El concepto de “Utopía”: Contempla hábitats humanos utópicos basados generalmente en el concepto de DS. Comúnmente, las utopías relacionadas con el DS permiten imaginar una sociedad perfecta, donde prevalezca la justicia, la gente está perfectamente contenta, la gente vive y prospera en armonía con la naturaleza, y la vida se mueve sin problemas sin abusos o escasez (Jabareen, 2008).
- g) El concepto de la “Agenda política global”: Representa un nuevo discurso global que se ha reconstruido e inspirado en las ideas de "Desarrollo Sostenible". Hasta la década de los 80's, los ambientalistas occidentales estaban preocupados en los espacios locales y nacionales (Sachs, 1999). Sin embargo, desde la década de los 90's, el DS se ha convertido en el adagio

central de las políticas ambientales en todo el mundo y el discurso ambiental ha sido globalizado y trascendido a través de las fronteras nacionales. El DS surge como una declaración política de una posición ética con implicaciones prácticas y teóricas (Doods, 2000).

La Figura 8.1, esquematiza la forma en que las siete vertientes conceptuales se integran para generar el concepto global del DS.



**Figura 8.1** Marco conceptual para el desarrollo sostenible modificado de Jabareen, 2008.

El concepto de la paradoja ética es el corazón de este marco conceptual. La paradoja entre la "sostenibilidad" y "desarrollo" se articula en términos de ética (Jabareen, 2008). Sin embargo, no existe un acuerdo general sobre cómo el concepto se traduce en la práctica (Berke y Conroy, 2000).

### 8.2.2 La importancia del agua subterránea en el desarrollo sostenible

Las aguas subterráneas y la gestión del uso del suelo se pueden utilizar como una jerarquía en la integración de planes y operaciones relacionadas a las necesidades de la sociedad. Para alcanzar el objetivo último de la sostenibilidad de los recursos se requiere del apoyo público, tanto para el apoyo financiero como para reducir al mínimo la contaminación del ambiente. La gestión eficiente del agua destinada al abastecimiento de una sociedad debe contemplar las necesidades de las generaciones futuras, la gestión sostenible del AS se presenta en una sociedad educada (Melloul y Collin, 2001).

La gestión sostenible del AS hace frente a la contaminación que puede incrementarse mediante la creación de vías preferenciales, reduciendo el tiempo que transcurre entre la aplicación de los contaminantes en la superficie del suelo y su aparición en las AS. Estos fenómenos

disminuyen la capacidad de amortiguamiento de la zona no saturada y aumentan la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos (Zoller *et al.*, 1998). Adicionalmente, a largo plazo la sobreexplotación del AS y el deterioro incontrolado por el uso del suelo afecta la calidad del AS lo cual disminuye el rendimiento de los campos de explotación (Appleyard, 1995; Howard *et al.*, 1996).

El cumplimiento de la gestión sostenible del AS puede incluir medidas operativas como la remediación del acuífero, de la calidad del AS y de su entorno ambiental (Melloul y Collin, 2001). Las preocupaciones y objetivos de la gestión de las AS y el uso del suelo debe ser tratado como un todo integrado, en el contexto de las realidades socio-económicas, educativas y políticas (Pretty, 1996). La gestión sostenible de los recursos de AS, se puede lograr a largo plazo sólo cuando el uso del suelo esta ecológicamente equilibrado con la capacidad de carga del terreno en cuestión, y cuando las necesidades humanas están satisfechas que permitan a la población estar dispuesta a centrar su preocupación y las finanzas en objetivos hidrológicos y medioambientales (Melloul y Collin, 2001).

Maslow concibió una jerarquía de cinco niveles de necesidades humanas, y los organizó en una pirámide. Su tesis se estipula que hasta que los niveles más bajos de las necesidades se hayan cumplido, una persona no podría hacer frente a mayores niveles de necesidad (Maslow, 1937; Maslow, 1943). La Figura 8.2 muestra la correspondencia entre las jerarquías de las necesidades sociales, los niveles de gestión del AS y los usos de suelo correspondientes a la gestión del AS.



**Figura 8.2** Integración de tres pirámides de necesidades sociales modificado de Melloul, 2001.

La gestión del AS está enfocada al cumplimiento de las necesidades biofísicas individuales. Sólo cuando estas necesidades están cumplidas, la sociedad puede preocuparse por las directrices de calidad, por los esfuerzos de remediación y sostenibilidad del recurso. Las etapas interrelacionadas de las pirámides mostradas en la Figura 8.2 se detallan a continuación:

- a) En el primer nivel de la pirámide, una situación similar a la del AS sucede con el uso del suelo, sólo cuando las necesidades locales se han cumplido, la población se interesará en participar en la mejora de su infraestructura a nivel regional, nacional e internacional.
- b) El segundo nivel consiste en obtener seguridad en la cantidad y la calidad del AS que abastece los vecindarios y mejora las actividades locales de uso del suelo. El cumplimiento de esas necesidades pueden beneficiar la salud individual y de grupo.
- c) El tercer nivel se centra en la protección de la salud social, la económica regional y el bienestar común, el mantenimiento de la calidad del AS es de alta prioridad. Todos los aspectos de la sociedad deben participar en la gestión del AS y en el ordenamiento territorial a corto plazo.
- d) En la jerarquía de las necesidades de gestión del AS se requiere la educación pública con el fin de desarrollar la conciencia y obtener el apoyo para la gestión del agua, las preocupaciones de ordenamiento territorial a escala nacional se centran en la remediación de los recursos degradados. Este nivel implica la planificación regional a largo plazo del uso de la tierra y el agua, integrado con las preocupaciones sociales, económicas y políticas que son motivadas por la crítica de la población.
- e) Por último, las personas comienzan a luchar por la realización personal, la sociedad se ocupa de mantener su derecho de nacimiento, de obtener la continuidad de sus bienes (recursos naturales), al asumir el reto de la sostenibilidad de los recursos. Sólo a este nivel de madurez social, fomentada por una sociedad debidamente educada y preparada psicológicamente, la gente puede lograr un enfoque internacional y tomar para sí la planificación a largo plazo y la globalización en lo que respecta al agua y uso de la tierra. Todas estas actividades persiguen de asegurar la disponibilidad de los recursos con buena calidad, necesaria para cumplir los requisitos de uso de las generaciones futuras. La planificación regional del uso del suelo en este punto exige un balance entre los servicios urbanos y rurales.

Los recursos hídricos y la gestión de uso de la tierra deben relacionarse con la transición de los niveles de necesidades de los usuarios y los beneficios, desde los niveles más básicos a los

niveles más sofisticados y desarrollados (Melloul y Collin, 2001). La Tabla 8.1 detalla las actividades de cada nivel jerárquico de los tres campos analizados.

**Tabla 8.1** Pasos necesarios en el tiempo para lograr el desarrollo sostenible de la integración de parámetros hidrogeológicos, uso de la tierra, y las necesidades socio-económicas tomado de Melloul (2001).

<b>Etapas en el tiempo</b>	<b>Jerarquía de las necesidades de gestión del agua subterránea</b>	<b>Jerarquía del uso del suelo y escala de las necesidades</b>	<b>Jerarquía de las necesidades psico-sociales</b>
5	La sostenibilidad de los recursos hídricos	Globalización y proyectos internacionales	Autorrealización de necesidades (preocupación por la humanidad)
4	Remediación de aguas subterráneas	Educación y sensibilización nacional	Autoestima de las necesidades (preocupación nacional)
3	Proyectos regionales y de cuencas incluyendo calidad y cantidad del agua subterránea	Proyectos regionales para la salud social y económica, legislación y multas	Preocupación social
2	Directrices locales de calidad y cantidad de agua subterránea	Agua segura para barrios y granjas	Seguridad y protección (preocupación familiar)
1	Cantidad física de agua subterránea	Abastecimiento local	Necesidades fisiológicas

### 8.3 LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

La década de los 80's vió una gran proliferación y la adopción de la tecnología SIG en la comunidad de la planificación urbana y regional. Esto puede atribuirse al hecho de que la planificación estratégica urbana y regional (incluyendo el uso de la tierra y la planificación del transporte) requiere el diseño y uso de sistemas de información a medida. Tales sistemas de información, en espacial en la naturaleza, pueden ser construidos sobre la tecnología existente SIG medio de la personalización del sistema (Pettit y Pullar, 2009).

Se ha afirmado que los sistemas de información y la planificación en la última década se han convertido en tareas gemelas. Un SIG ofrece una representación coherente de un conjunto de unidades geográficas u objetos que además de su ubicación se puede caracterizar por uno o más atributos, por eso un SIG proporciona una excelente herramienta para el análisis de esta información para las tareas de planificación urbana y regional (Pettit y Pullar, 2009).

Los SIG pueden ser útiles en múltiples actividades que se pueden clasificar en dos grandes grupos: a) *gestión y descripción del territorio*: el objetivo en este campo es responder ¿Dónde están

las cosas?, y b) *ordenación y planificación del territorio*: donde se trata de responder principalmente ¿Donde deben estar las cosas? (Bosque-Sendra y García, 2000).

Para la gestión y descripción del territorio las funciones que más se emplean son: a) entrada de datos orientadas a la creación de bases de datos, b) las relacionadas a la organización y gestión adecuada de esta importante y compleja base de datos, c) la cartografía y presentación de resultados y d) búsqueda selectiva de información. En la ordenación y planificación del territorio principalmente se usan: a) la búsqueda selectiva de información, b) exploración y descripción de datos, c) generación de modelos explicativos y su confirmación con la información preexistente y d) La manipulación de la información en la superposición y cambio de tipo de elemento entre otras (Bosque-Sendra y García, 2000; Parent y Church, 1987).

Los aspectos espaciales de la planificación urbana y regional puede ser interpretados en un marco general, donde las diversas actividades de planificación se ven como algo que ocurre dentro de las dimensiones espaciales y temporales (Pettit y Pullar, 2009). Sin embargo las funcionalidades de la mayoría de los SIG están a la altura para satisfacer los requerimientos de la planificación y toma de decisiones (Greetman, 1999; Jankowski, 1995; Malczewski, 1999).

Un SIG debe ser capaz de abordar los siguientes cuatro grupos de funciones que se asocian generalmente con la secuencia lógica de análisis espacial: selección, manipulación, exploración y confirmación (Kropp, 2010; Sharifi y Retsios, 2003).

#### **8.4 LOS CRITERIOS MÚLTIPLES DE DECISIÓN EN LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO**

Las técnicas CMD apoyan la toma de decisiones, estas herramientas están diseñadas para analizar problemas de decisión, generar alternativas útiles y evaluar alternativas basadas en la valoración y las preferencias de los tomadores de decisión (Eldrandaly *et al.*, 2005).

Los CMD constituyen un variado conjunto de métodos matemáticos que permiten medir, de la manera más precisa posible, la validez relativa de cada criterio de un conjunto de soluciones respecto a un problema concreto. La evaluación se realiza de tal manera que se tienen en cuenta un alto número de criterios, cada uno de los cuales valora de modo independiente las soluciones (Bosque-Sendra y García, 2000).

Los CMD tuvieron su origen en la economía y en la ciencia política y de decisión, pero en los últimos años se ha empezado a introducir como una herramienta válida en los SIG (Barba-Romero y Pomerol, 1997; Barredo, 1995; Romero, 1993). La incorporación de indicadores con la decisión

multicriterio han demostrado proporcionar una asistencia importante en la estructura de la toma de decisiones (Lenz y Beuttler, 2003; Ortigosa *et al.*, 2000; Store y Kangas, 2001).

En cuanto al análisis de la sostenibilidad, los CMD ganan mayor popularidad en comparación con otras técnicas, tales como Análisis Costo-Beneficio (ACB), y Análisis de Impacto Ambiental (EIA), debido a la dificultad para evaluar los impactos ambientales en términos económicos y la necesidad de ubicar en los mejores sitios las actividades a desarrollar (Brandon y Lombardi, 2005).

CMD proporcionan una estructura que hace frente a complejos problemas, aplicando la interconexión de factores en análisis a través de una ponderación de clasificación que puede ser introducida dentro de un SIG (Kropp, 2010). El objetivo general de los CMD es ayudar a quien toma las decisiones en la selección de la mejor alternativa de una serie de alternativas viables en virtud de la presencia de criterios de selección múltiple y las prioridades impuestas (Jankowski, 1995).

#### **8.4.1 Técnicas de decisión Multi-Atributo y Multi-Objetivo**

Las técnicas de Decisión Multi-Atributo (DMA), se refiere a la elección de un conjunto moderado o pequeño de alternativas viables (Jankowski, 1995). Conocidas comúnmente como Análisis de Decisión Multicriterio (ADM). Las técnicas de Decisión Multi-Objetivo (DMO), está más preocupado por el problema de diseño en un espacio de decisión limitada por las restricciones. Los modelos DMO se derivan de las preferencias de ponderación de los objetivos y la relación entre los atributos y los objetivos. Este tipo de análisis acentúa que los objetivos son una variable abstracta que expresa las preferencias de quien toma las decisiones (Malczewski, 1999).

La técnica de CMD comienza con la generación de un conjunto discreto de alternativas, la formulación de un conjunto de criterios y la evaluación del impacto de cada alternativa en cada criterio (Jankowski, 1995). Los criterios de entrada están organizados en una matriz de decisión, las filas de la matriz representan las alternativas, cada atributo se ubica en una columna en la matriz de decisión, las celdas de la matriz contienen los valores de medición o evaluación de los atributos con respecto a las alternativas, en general, los modelos de participación CDM están conformados por 6 componentes (Malczewski, 1999):

- a) El objetivo u objetivos que el tomador de decisiones espera alcanzar
- b) El tomador de decisiones estipula sus preferencias con respecto a los criterios de evaluación
- c) Un conjunto de criterios de evaluación en donde la decisión debe evaluar las alternativas.

- d) El conjunto de alternativas de decisión
- e) El conjunto de variables incontrolables o estados de la naturaleza
- f) El conjunto de resultados asociados con cada alternativa

#### **8.4.2 Las técnicas de decisión multicriterio (DMC)**

Las técnicas DMC se pueden clasificar por el nivel de procesamiento cognitivo exigido y el método de agregación de las puntuaciones de criterio. En el plano cognitivo, dos clases se pueden identificar: compensatorios y no compensatorios. Las técnicas compensatorias permiten el alto rendimiento de una alternativa en uno o más criterios para compensar el débil desempeño de la misma alternativa en otros criterios (Jankowski, 1995).

El planteamiento de la compensación cognitivo es más exigente que la técnica no compensatoria, ya que requiere del tomador de decisiones para expresar las preferencias de criterio como pesos cardinales o funciones prioritarias. El enfoque no compensatorio no permite puntuación más alta de un criterio para compensar la baja puntuación de otro criterio (Jankowski, 1995).

Las clases de técnicas de compensación adicionales se pueden dividir según el método de agregación en: técnicas aditivas y técnicas basadas en el enfoque de punto ideal. Las técnicas aditivas estandarizan las puntuaciones de los criterios para permitir la comparación en una escala común, de esta manera se puede realizar las compensaciones entre los criterios. El procedimiento más usado es la suma ponderada, o ponderación aditiva simple (Jankowski, 1995).

Las técnicas no compensatorias no permiten la negociación fuera de las deficiencias de los criterios de evaluación de fortalezas entre los demás criterios de evaluación. Este conjunto de técnicas requieren un procesamiento cognitivo reducido y por lo tanto tienen la ventaja de poder ser utilizado cuando los tomadores de decisiones no pueden establecer sus preferencias (Jankowski, 1995).

#### **8.5 PLANIFICACIÓN TERRITORIAL SOSTENIBLE Y TOMA DE DECISIONES EN EL DOMINIO ESPACIAL**

Entendemos por planificación territorial las actividades realizadas para establecer políticas que deben ser seguidas por la población y agentes económicos en cuanto al uso de los recursos naturales, la protección del medio ambiente y la asignación de las diferentes actividades. La planificación territorial supone, principalmente el establecimiento de los usos apropiados para

cada porción del territorio (Bosque-Sendra y García, 2000). La planificación puede ser definida como "el arte de organizar el espacio" (Kozlowski, 1988) y la toma de decisiones está orientada a equilibrar las metas futuras y las deficiencias actuales (Pettit y Pullar, 1999)

La decisión sobre los usos de suelo depende de razones y criterios derivados de la conservación del ambiente natural y deben tener en cuenta tanto la vocación "intrínseca" de cada punto del territorio determinada por su aptitud para cada uso o actividad, como el impacto potencial que tendrá sobre el medio ambiente la realización de una determinada actividad en ese punto del territorio (Bosque-Sendra y García, 2000).

La planificación sostenible de los recursos del uso de suelo puede ser definida como "el instrumento, para establecer políticas de uso del suelo, para la ubicación correcta de los diferentes usos del suelo y para las mejoras de las condiciones espaciales y físicas a largo plazo, al mismo tiempo satisfacer las necesidades y aspiraciones de las generaciones presentes", donde los principios de equidad intra e inter-generacional deben estar integrados a los principios ecológicos, económicos y sociales (Bronsveld *et al.*, 1994; Hurni, 2000; Van Lier, 1994).

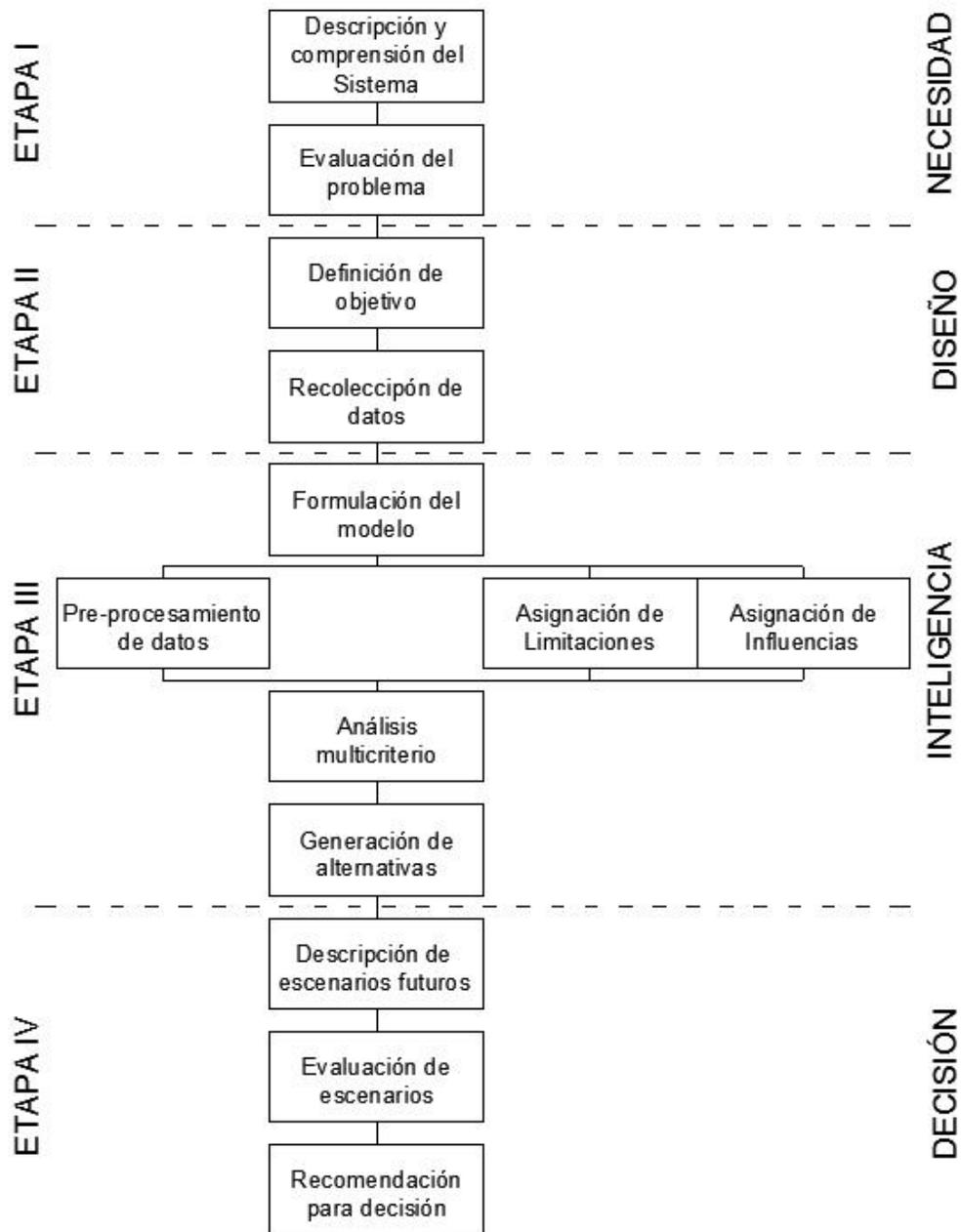
La integración de los SIG y los CMD enriquecen de modo importante las posibilidades tradicionales de un SIG para el análisis de la información geográfica. Para lo cual los nuevos instrumentos de análisis geográfico pueden cumplir diferentes funciones en las distintas etapas en que se suele dividir un proceso de planificación territorial (Arentze *et al.*, 1996).

En la fase de identificación del problema, los SIG son muy útiles por su capacidad de analizar los datos geográficos que definen el problema a tratar y a resolver con la planificación territorial y ambiental. El objetivo futuro sería la integración dentro de los programas SIG de funciones potentes de análisis estadístico (Hoaglin y Mosteller, 1983).

Dos áreas distintas de la investigación como son los SIG y los CMD pueden beneficiarse mutuamente, las técnicas de SIG tienen un papel importante que desempeñar en el análisis de problemas de CMD a través de la automatización, gestión y análisis de una variedad de datos espaciales para la toma de decisiones. La integración de estas tecnologías a través de una interfaz interactiva y fácil de usar constituyen el marco espacial de los sistemas de soporte de decisiones y ayudar a mejorar la eficacia de la toma de decisiones mediante la incorporación de juicios de valor de quienes toman las decisiones y programas de computadora basados en la toma de decisiones (Laskar, 2003).

La planificación racional se ocupa de responder preguntas como: ¿Cuál es el problema?, ¿Cuáles son las alternativas disponibles?, ¿Qué alternativa es la mejor?. En la presente investigación se propone el uso de un modelo con cuatro fases que son: Necesidad, Diseño,

Inteligencia y Decisión. La Figura 8.3 esquematiza el diagrama de flujo para la integración de las fases en el modelo propuesto.



**Figura 8.3** Diagrama de flujo para la toma de decisiones

- Necesidad:* es la etapa en la cual se analiza el sistema actual a partir de los resultados de este análisis es posible determinar y evaluar los problemas presentes en la región de análisis.
- Diseño:* se refiere a la definición del objetivo. La discrepancia entre el estado actual y el estado deseado se reconoce como una necesidad y esa necesidad se formula como un

problema que necesita de una decisión para concretar la situación futura, en esta etapa se realiza también la evaluación de la disponibilidad y acceso a los datos para la creación de la base de datos que permitirá el análisis numérico de la realidad.

- c) *Inteligencia*: se refiere a la formulación del modelo, generación, desarrollo y análisis variables, limitaciones e influencias para la solución del problema. Finalmente como producto de la evaluación de criterios múltiples, se generan alternativas.
- d) *Decisión*: es la etapa final y se refiere a la descripción y evaluación de las alternativas que resultan en la recomendación orientada a asumir decisión más adecuada.

## **8.6 PLANIFICACIÓN TERRITORIAL HIDROGEOLÓGICAMENTE SOSTENIBLE DEL ÁREA DE LA CIUDAD DE LINARES**

La metodología para determinar el patrón espacial de desarrollo sostenible sigue un procedimiento de 4 etapas: a) determinar la necesidad de los problemas presentes; b) definir y recopilar datos para diseñar el modelo; c) procesamiento de datos y especificación de las influencias y limitaciones y d) describir, evaluar las alternativas para recomendar una decisión. La Figura 8.3 muestra el diagrama de flujo aplicado.

### **8.6.1 Etapa I - Necesidad**

#### *8.6.1.1 Descripción del sistema*

La situación actual del área de estudio en la presente investigación carece de planificación ambiental y territorial, las condiciones naturales del sistema hidrogeológico se ven modificadas por las actividades humanas, como consecuencia, se determinó las modificaciones importantes en la calidad del AS, así como se determinó un importante cambio de uso de suelo en la región, estas variables afectan primordialmente los sistemas de flujo y los niveles de explotación y aprovechamiento del recurso hídrico.

#### *8.6.1.2 Evaluación del problema*

Las actividades antropogénicas típicas de una ciudad con desarrollo industrial, económico y comercial producen modificaciones en los ecosistemas circundantes, situación que está presente en el área de estudio, hecho que deriva en un crecimiento urbano de la ciudad y sus límites físicos,

provocando importantes cambios de uso de suelo. Paralelamente la concentración de mayor cantidad de seres humanos en la urbe requiere de mayores volúmenes de agua y recursos para satisfacer sus necesidades, lo que obliga a una mayor explotación de AS. Estas actividades generan mayores cantidades de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que son reingresados a los ecosistemas, la introducción de agentes ajenos al ecosistema natural modifica sus condiciones de equilibrio intrínsecas, lo cual deriva indudablemente en un deterioro en la calidad de los recursos.

Actualmente, no se tiene conciencia de los enormes problemas que ésta combinación de factores tendrá en el futuro de Linares ya que los problemas ambientales son de difícil detección en sus etapas iniciales si no se toman medidas preventivas, por lo que las consecuencias son graves y de muy compleja y costosa resolución, impidiendo que se alcance el objetivo del DS.

### **8.6.2 Etapa II – Diseño**

Para iniciar el desarrollo de modelos sostenibles, los factores que simbolizan el desarrollo sostenible deben ser evaluados (Malczewski, 1999). En el caso particular se presenta una expansión de los campos agrícolas, no están definidas las llanuras de inundación, los cuerpos de agua no tienen una política de gestión, la expansión física de la ciudad y la topografía no se consideran en los planes de crecimiento urbano de Linares.

Por otra parte, factores importantes como: conectividad con las carreteras principales, la calidad del AS, la vulnerabilidad de los acuíferos, la evaluación para áreas de cultivo y asentamientos humanos, las características geológicas y de calidad de los suelos, así como la distribución de la población, no son incluidos en los planes de desarrollo.

Esta realidad justifica la creación de un modelo con CMD integrados a un SIG, que permita generar alternativas de los usos de suelo futuros, con el objetivo de alcanzar un desarrollo sostenible de la ciudad de Linares y sus alrededores.

#### *8.6.2.1 Objetivo final*

Desarrollar un modelo digital que integre los CMD y cartografía temática en una plataforma SIG orientada al desarrollo sostenible de usos de suelo futuros para la ciudad de Linares y sus alrededores.

### 8.6.2.2 Recopilación de datos y procesamiento previo

El segundo paso de la etapa de diseño implica la recolección de datos pertinentes, la conversión de los mismos a los formatos de archivo adecuado para su tratamiento, incluye también la normalización espacial de archivos y del tamaño de la celda. Todos los datos pertinentes fueron importados en ArcMap, mediante el proceso de digitalización y generación de información con la utilización de diferentes herramientas del *ArcToolBox*.

Los archivos en formato *shapefile* fueron convertidos al formato *raster* utilizando celdas de 10x10m de tamaño. A todos los archivos se les asignó la proyección: NAD 1927. El límite de análisis corresponde a la extensión del *shapefile* que identifica el perímetro de la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo en la porción contenida por la Planicie Costera del Golfo de México.

De esta manera se obtiene la base de datos digitales que permitirá su análisis matemático y espacial en la evaluación del análisis multicriterio.

## 8.6.3 Etapa III - Inteligencia

### 8.6.3.1 Formulación del modelo

Tras la recolección de datos es necesario realizar una revisión con un pre-procesamiento para verificar la coincidencia en la cobertura de las diferentes capas temáticas. Las capas de datos que representan cada restricción y cada influencia se crearon en ArcGIS.

Como hipótesis asumidas en el modelo se asume que las áreas cubiertas por los factores de restricción (Figura 8.4), eliminan cualquier posibilidad de desarrollo sobre ellas. La segunda hipótesis para el análisis es que los factores influyen en el patrón espacial del desarrollo sostenible por su ubicación geográfica, la cual se relaciona a los factores en análisis por la distancia euclidiana (Figura 8.5). La asignación de pesos representa el nivel de importancia de cada restricción o influencia y se consideran en la evaluación multicriterio dentro de la plataforma SIG.

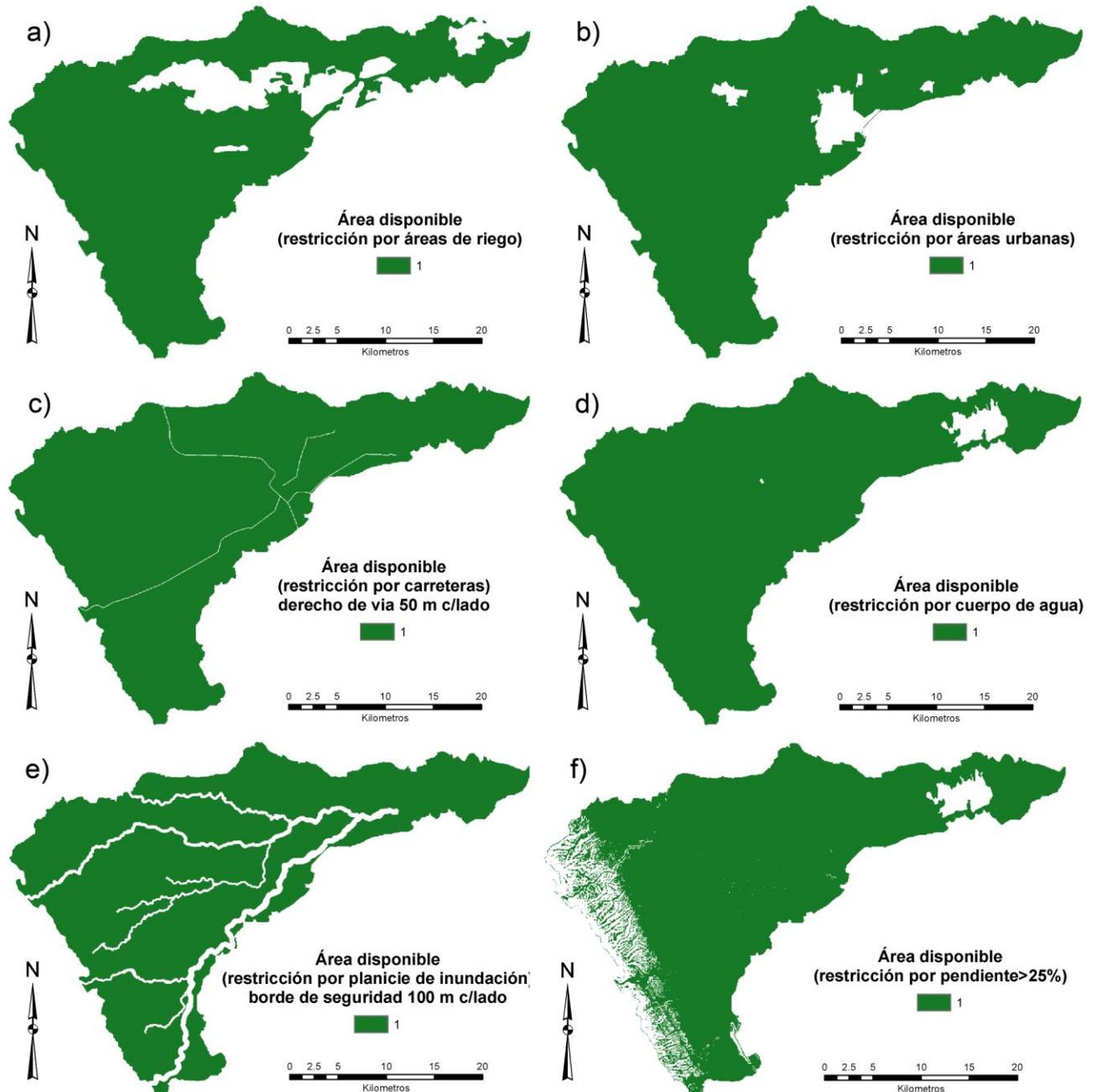
### 8.6.3.2 Restricciones

- a) Áreas de riego: es el primero de los seis factores seleccionados que limitan el modelo. Son suelos de importancia significativa que se destinan a la producción de alimentos. Esto asegura que las tierras serán cultivadas para la producción agrícola de alimentos en situaciones de emergencia. Estos suelos tienen características litológicas, físicas y químicas importantes que producen cultivos de alto rendimiento por lo que deben ser protegidas.

Por otra parte estas áreas cuentan con infraestructura desarrollada que permite el riego continuo, hecho que facilita la producción agrícola. Por ser la producción citrícola el motor económico de la zona de Linares, estas áreas agrícolas deben de cuidarse y mantenerse.

- b) Área urbana actual: El actual perímetro de la ciudad de Linares denota un marcado crecimiento en 28 años (1981-2009), pero en su interior no se tienen un uso eficiente del suelo y los espacios, lamentablemente el catastro a detalle no está actualizado, por lo cual se asume que el desarrollo futuro consolidará las construcciones en los espacios vacíos al interior del perímetro de la ciudad en 2009, motivo por el cual el límite actual restringe el crecimiento. Toda el área al interior de este perímetro será tratada como uso de suelo urbano, imposibilitando el análisis de futuros usos de suelo al interior de este perímetro.
- c) Carreteras: Debido a que la zona tiene un carácter agrícola, el acceso fácil y constante a las zonas de cultivo es primordial para permitir la comercialización de los productos y facilitar la provisión de insumos a los cultivos, motivo por el cual, las áreas sobre las que está distribuida la red de las principales vías será respetado, impidiendo otros usos de suelo en estas zonas.
- d) Cuerpos de agua: son el cuarto factor de limitación. Los cuerpos de agua se definen como mares, lagos, arroyos, lagunas o cualquier cuerpo de agua que puede apoyar los peces, recreación, o uso humano (USGBC, 2005). Se asume un buffer de 50 metros alrededor de estos cuerpos para protegerlos de las perturbaciones humanas. La protección de las masas de agua sirven para proteger los hábitats acuáticos, el acceso al agua potable y los usos recreativos. La Presa Cerro-Prieto es de especial importancia, porque capta las aguas superficiales de la cuenca y el agua contenida en este embalse tiene fines de abastecimiento de agua potable para una población mayor a 3.5 millones de habitantes, motivo por el cual se debe priorizar una buena calidad química del agua.
- e) Llanura de inundación: Evitar la llanura de inundación es primordial para evitar daños a la infraestructura urbana y a sus habitantes, se utiliza el ancho de línea de base de retroceso de la llanura de inundación de 100 años de registro que rodean los arroyos y lagos. La protección de la llanura de inundación reduce los riesgos de inundación a los propietarios y los ecosistemas locales al mismo tiempo minimizan los riesgos asociados a la seguridad y la salud pública. Para definir este límite de protección, se realizó la medición de secciones de los principales ríos de la zona de estudio posteriores al mayor evento registrado, que fue el más importante en el noreste de México, el nivel de daños que produjo la tormenta tropical Alex el 2 de Julio del 2010 no tiene precedentes en la historia climatológica de la zona. Por esta razón, esta investigación paralela refleja la real magnitud destructiva de los procesos de inundación en la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo.

- f) Pendiente topográfica: restricción que permite el emplazamiento de nuevas construcciones en áreas topográficamente aptas, pendientes mayores a 25° son tratadas como zonas de protección natural impidiendo un uso de suelo distinto, evitando de esta forma los riesgos de deslizamientos geológicos y movimientos en masa generados por el desarrollo urbano a través de obras civiles.



**Figura 8.4** Distribución geográfica de las restricciones: a) Por áreas de riego; b) Por áreas urbanas; c) Por carreteras principales; d) Por Cuerpos de Agua; e) Por Llanuras de Inundación y f) Por pendiente topográfica.

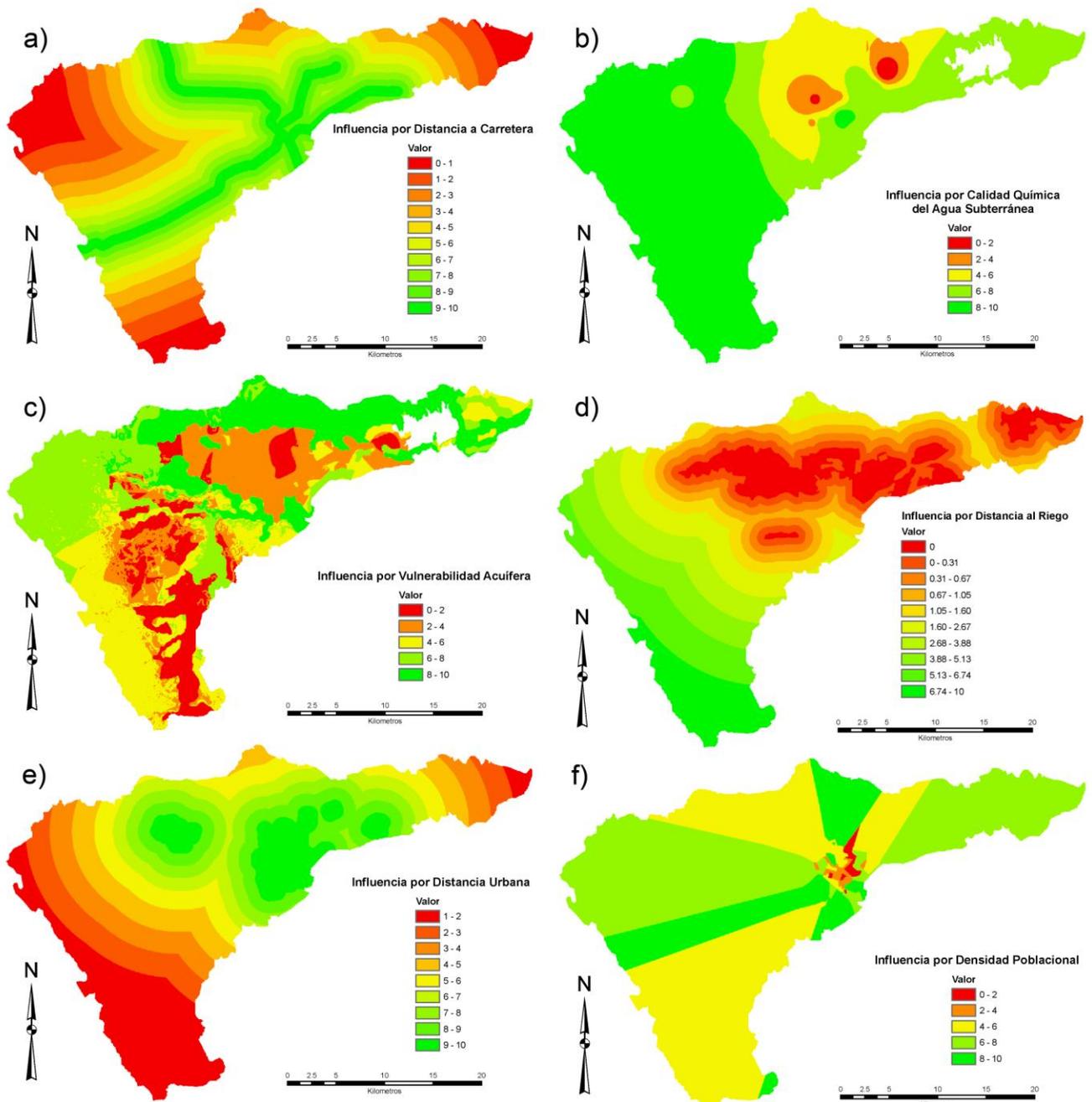
### 8.6.3.3 Influencias

- a) Vinculación carretera: El acceso al tránsito por carreteras es el factor que influye en primer lugar, ya que permite una vinculación constante del área con otros centros urbanos, la ubicación estratégica de Linares es favorable como punto de encuentro y vinculación carretera importante para los estados de Nuevo León y Tamaulipas, las carreteras vecinales permiten una vinculación directa con los municipios de Iturbide, Galeana, Hualahuises entre otros. Por ser un centro de prestación de servicios y abastecimiento de víveres, Linares es el centro urbano más importante de la región citrícola del noreste de México, adicionalmente la comercialización y distribución de la producción agrícola se realiza exclusivamente por la vía terrestre. Por estas razones una buena vinculación a la red vial tiene una influencia positiva en las áreas objeto del análisis. Por tanto, mientras más cerca este el punto de análisis a una carretera obtendrá un mayor valor de sostenibilidad.
- b) Clusters de la calidad hidrogeoquímica del agua subterránea: como el objetivo de este estudio es incorporar la hidrogeología urbana como parámetro importante en el desarrollo sostenible de los usos de suelo, la calidad química del AS es primordial para promover el desarrollo sostenible. Los datos utilizados en este parámetro son los resultados obtenidos por el análisis del análisis estadístico multivariado donde se obtuvieron clusters en base a la calidad química de cada punto de muestreo. Estas zonas son el resumen de una larga base hidrogeoquímica de datos. Por lo tanto, mientras más alto sea el grupo de calidad hidrogeoquímica, la zona tendrá menos aptitud de viabilizar el desarrollo sostenible.
- c) Vulnerabilidad de los acuíferos: La determinación de la vulnerabilidad acuífera involucra 7 parámetros que fueron analizados aplicando el método DRASTIC, la clasificación obtenida identifica 5 grupos dependiendo del grado de vulnerabilidad de los acuíferos, los parámetros analizados son hidrogeológicos, por tanto son producto de un análisis geológico, hidrogeológico, hidrológico y de suelos. Definiéndose para fines de evaluación matemática que mientras más vulnerable sea el punto de análisis se obtendrá menor valoración para el desarrollo sostenible.
- d) Distancia a las zonas de riego: La distancia física entre un punto de análisis con respecto a una zona de riego impacta de manera significativa la probabilidad de determinar nuevas áreas de cultivo, ésta característica genera mayores posibilidades de crecimiento económico, por lo tanto influye positivamente en su valoración, se asumió que mientras más lejos el punto considerado de una zona de riego, tendrá mayor aptitud en la valoración del desarrollo.

- e) Distancia a los asentamientos humanos: este factor influye preponderantemente en la predicción del crecimiento urbano, debido a que los nuevos emplazamientos humanos se realizan colindando a la infraestructura consolidada. Esto significa que se requiere menor inversión económica para implementar las redes de servicios básicos y de abastecimiento de insumos a estas nuevas áreas. El crecimiento urbano, se extiende progresivamente consolidando nuevas áreas dentro de los límites de las ciudades, generando un cambio progresivo en el uso del suelo. En atención a esta justificación se determinó que mientras más cerca este el punto analizado a la zona urbana, más aptitud de crecimiento urbano le será asignado.
- f) Distribución de la densidad poblacional: la concentración de muchas personas en espacios reducidos es identificado como un factor negativo en la gestión de los recursos, donde normalmente se va minando paulatinamente los recursos hídricos de la zona. Esta situación también se presenta en Linares, donde las zonas más densamente pobladas obligara una mayor explotación del AS en esos sectores, prueba clara de esta realidad es la mayor densidad de pozos de extracción en estas zonas. Por lo tanto, con el fin de redistribuir la explotación de AS el estudio consideró que mientras menor sea la distancia del punto analizado a una densidad poblacional alta, se asumirá una menor aptitud de crecimiento urbano.

Los pesos de valoración fueron asignados a cada mapa temático con base a su importancia relativa en el modelo de desarrollo sostenible y luego se combinan con la función *raster calculator* del software ArcMap.

Después de importar los datos raster en ArcMap, se deben definir las capas de datos para los factores restrictivos que deben contener los valores apropiados para representar los terrenos inutilizables. Las capas de información con los factores de influencia que muestran cómo se descompone el concepto de sostenibilidad representada por la distancia a las fuentes también deben ser definidas. Los valores de *NoData* fueron asignados a todas las zonas limitadas a través de la función *Reclassify*. El valor de 1 fue asignado a todas las demás áreas usando la misma función. Estas zonas *NoData* representan las zonas donde no puede haber desarrollo sostenible. Los factores que influyen en el cálculo numérico se convierten en *rasters* de distancia. La función *Euclidean Distance* en la extensión *Spatial Analyst Tools* se utilizó para calcular la distancia desde estos sitios para cada celda de cada *raster*. Los *rasters* de distancia resultantes (cada factor de influencia) tienen tamaños de celdas iguales a 10 m de lado y abarcan toda el área al interior del límite del área de estudio.



**Figura 8.5** Distribución geográfica de las influencias: a) Debidas a vías de comunicación importantes; b) Debidas a la calidad físico-química del agua subterránea; c) Debidas a la vulnerabilidad del acuífero; d) Debidas a zonas de riego; e) Debidas a la presencia de centros urbanos y f) Debidas a la distribución de la densidad poblacional.

#### 8.6.3.4 Análisis multicriterio y ponderación aditiva simple

El suma pondera (SP) es un método de puntuación, el cual se utilizó para diseñar el modelo. Este método se basa en el promedio ponderado, donde se calcula el puntaje de evaluación para cada alternativa multiplicando el peso de importancia que se asigna para cada atributo por el valor de escala dado a esa alternativa en ese atributo, posteriormente se realiza una sumatoria de los productos para todos los criterios (Malczewski, 1999).

Este método fue elegido por su fácil implementación en un SIG mediante operaciones de álgebra de mapas y la transparencia en la toma de decisiones. Como se discutió en la información general de la sección técnicas CMD, el método de la SP proporciona una evaluación cognitivamente intensiva, para ayudar a quien toma las decisiones en la selección de la mejor alternativa de una serie de alternativas viables en virtud de la presencia de criterios de selección múltiple y las prioridades que se pueden implementar en el modelo. El método de la SP desarrollado en el SIG tiene los siguientes pasos (Malczewski, 1999):

- a) Definir los conjuntos de criterios de evaluación y de alternativas viables
- b) Estandarizar cada criterio en capa de mapa temático
- c) Definir criterio de pesos, es decir, un peso de "importancia relativa" es directamente signado a cada criterio de cada mapa temático
- d) Construir las capas ponderadas estándar, es decir, multiplicar las capas estandarizadas por sus pesos de importancia relativa correspondiente
- e) Generar la puntuación global para cada alternativa con la operación de adición en la superposición de capas de los mapas ponderados normalizados. Las áreas con las puntuaciones más altas representan la mejor alternativa.

El método de la SP considera dos hipótesis en su funcionamiento que son: la linealidad y la adición de atributos (Malczewski, 1999). El supuesto de linealidad significa que la conveniencia de una unidad adicional de un atributo es constante para cualquier nivel de ese atributo. La suposición de aditividad significa que no hay efecto de la interacción entre los criterios.

Las ventajas de utilizar el método SP son muchas e importantes. El procedimiento es ampliamente utilizado en el mundo real debido a su simplicidad y facilidad de ejecución. El método SP es de fácil implementación en cualquier SIG con funciones de superposición para proporcionar una clasificación ordinal de las alternativas (Malczewski, 1999).

La herramienta Raster Calculator en ArcMap se utilizó para normalizar cada raster de distancia a una escala común de 0 a 10. Las áreas que son más sostenibles tienen valores cercanos a 10, mientras que las zonas menos sostenibles tienen valores más aproximados a cero. Para lograr esto, cada capa de datos de distancia debe dividirse por una capa de datos que tienen un valor constante igual al valor máximo de la capa de datos de distancia de cada factor, con este paso se logra que los datos resultantes estén en el rango de 0 a 1 y luego se multiplican por otra capa con el valor constante igual a 10. Las capas que tienen 5 categorías definidas con números enteros (de 1 a 5), se multiplican por una capa con valor constante igual a 2, con este procedimiento se tienen todos los valores numéricos de las capas de influencia dentro el rango normalizado (0 a 10).

Los pesos de importancia relativa que representan la influencia se expresan en porcentaje en el modelo de evaluación donde el valor igual a 0 significa (ninguna influencia) y un valor igual a 1 (significa influencia total). La sumatoria de los pesos de influencia relativa debe sumar 1. Varios modelos se llevaron a cabo, con diferentes factores y ponderaciones para determinar la distribución espacial del desarrollo sostenible. Los pesos específicos para cada capa de datos en todos los modelos se muestran en la Tabla 8.2.

**Tabla 8.2** Pesos de importancia relativa para los 5 escenarios propuestos

<b>Factor</b>	<b>Escenario A</b>	<b>Escenario B</b>	<b>Escenario C</b>	<b>Escenario D</b>	<b>Escenario E</b>
Vinculación carretera	0.16666	0.25000	0.00000	0.00000	0.10000
Clusters calidad AS	0.16667	0.00000	0.33334	0.30000	0.25000
Vulnerabilidad acuífero	0.16667	0.00000	0.33334	0.20000	0.20000
Zonas de riego	0.16667	0.25000	0.33334	0.00000	0.30000
Asentamientos Humanos	0.16667	0.25000	0.00000	0.30000	0.25000
Densidad Poblacional	0.16666	0.25000	0.00000	0.20000	0.15000

## 8.6.4 Etapa IV – Decisión

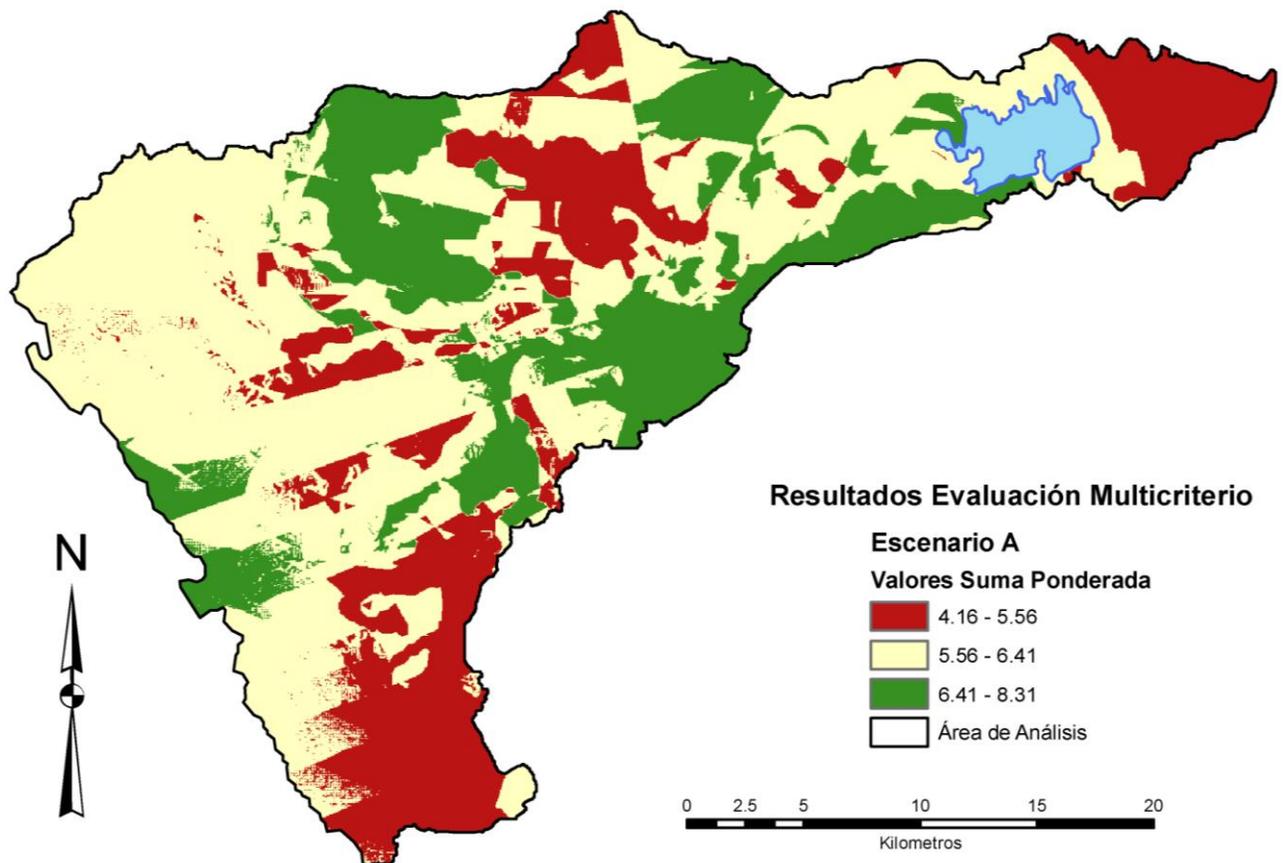
### 8.6.4.1 Descripción de escenarios futuros

El objetivo final de la conceptualización, evaluación y desarrollo de la presente investigación fue mejorar el proceso de planificación y lograr un mundo más sostenible. Los escenarios se construyen a sí mismos como las historias que describen los estados del medio ambiente actuales y las situaciones más probables a futuro. Todos los escenarios están categorizados en 3 clases, donde el color rojo indica las zonas con baja sostenibilidad (generalmente los valores más bajos de

la evaluación), las zonas con sostenibilidad media (se representan en color amarillo claro) y las áreas más sostenibles tienen las puntuaciones más altas (zonas en color verde oscuro). Las categorías fueron clasificadas utilizando el método de Natural Breaks (Jenks), que es recomendado para datos espaciales distribuidos de manera no uniforme.

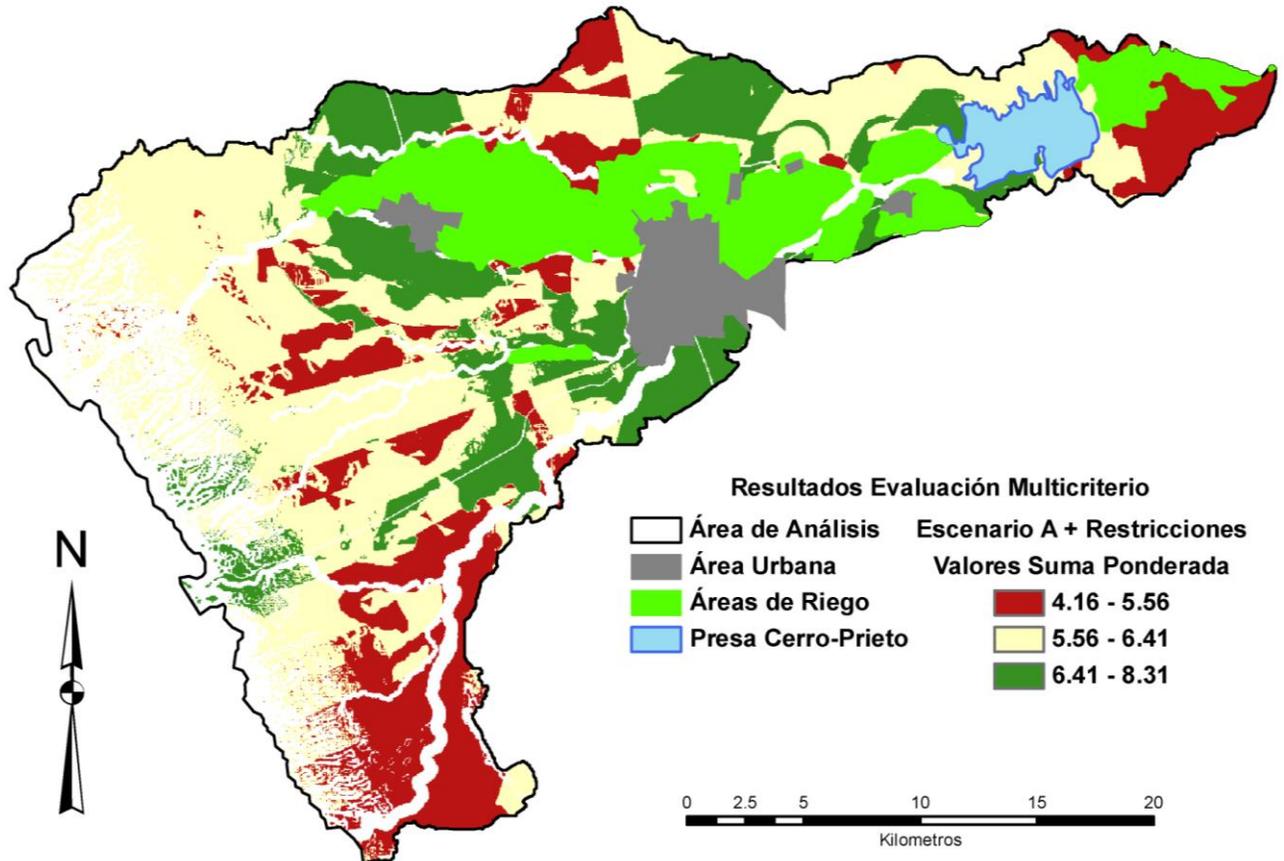
***Escenario A: Pesos de importancia relativa iguales***

El primer modelo representa la opinión de que todos los factores del desarrollo sostenible deben ser tratados con el mismo nivel de importancia. El tratamiento idéntico de los factores en importancia al evaluar el desarrollo sostenible se relaciona directamente con el modelo de tres pilares del desarrollo sostenible, donde se pregona que el desarrollo sostenible sólo es posible cuando todos los factores se toman en cuenta y recibir el mismo trato. Las preferencias del decisor no se ven reflejadas en este modelo. Este escenario de uso múltiple para el desarrollo sostenible no hace hincapié en un factor sobre otro, sino que debe ser visto como un escenario de referencia que no tiene en cuenta las preferencias especiales del tomador de decisiones o planificador. El primer escenario utiliza un peso de 0.16667 para los 6 de los factores que influyen en el modelo espacial CMD (Tabla 8.2). Esta distribución uniforme del peso proporciona un estándar, para la comparación de los siguientes modelos. Los factores restrictivos se han tenido en cuenta.



**Figura 8.6** Situación para el Escenario A: Interacción de factores de influencia.

La Figura 8.6 presenta el resultado de la interacción luego de evaluar el escenario con el análisis con criterios múltiples, donde se obtienen valores de sostenibilidad intermedios siendo el mínimo igual a 4.16 (color rojo) mostrando predominancia en la zonas este, centro-norte y suroeste.



**Figura 8.7** Situación para el Escenario A: Modelo final donde se combinan factores de influencia y restricción.

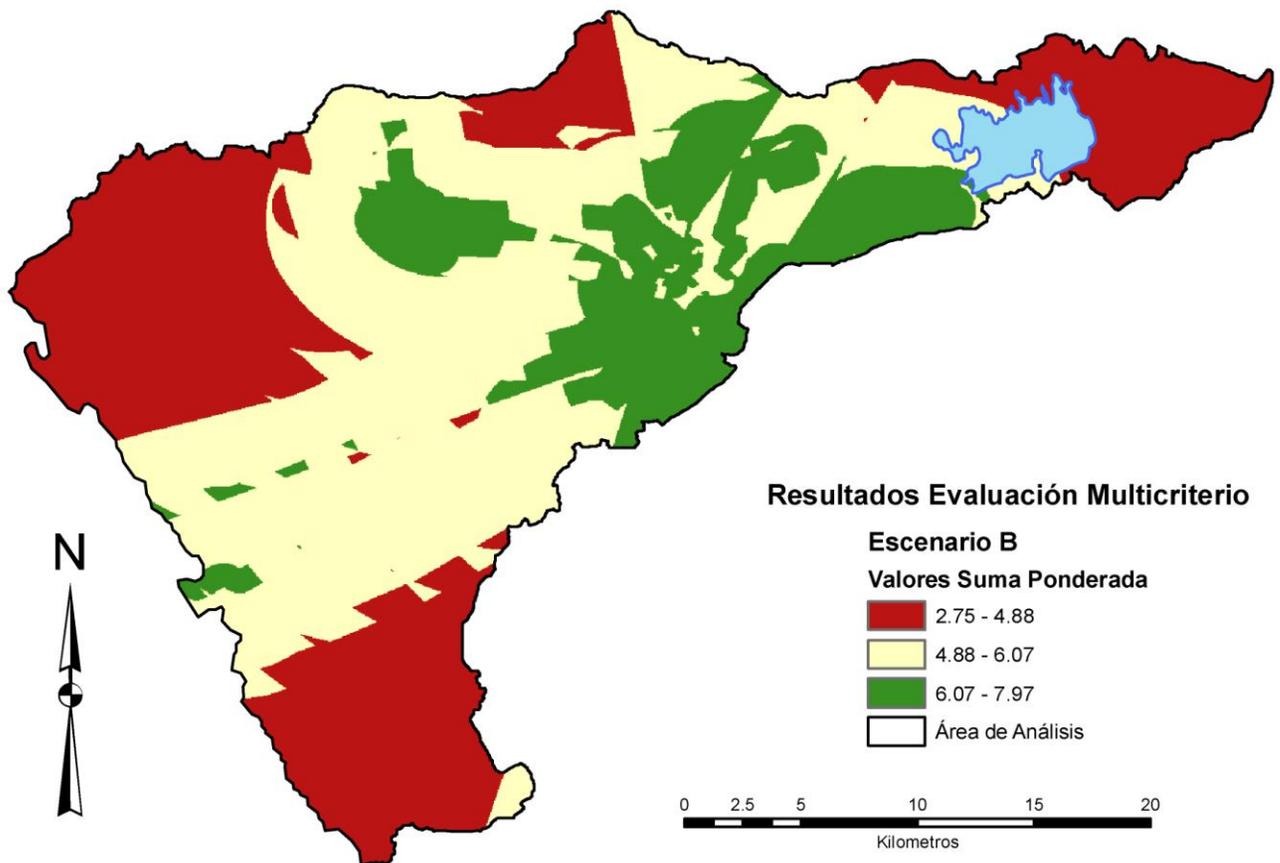
La Figura 8.7 es la integración final del modelo donde los factores de restricción están incluidos, se evidencian que las zonas más aptas para un desarrollo sostenible están ubicadas al norte y sur de Linares y Hualahuises respectivamente, hacia el oeste se presentan valores intermedios, lo que significa sostenibilidad a mediano o largo plazo bajo análisis de actividades detallado.

### **Escenario B: Planificación territorial tradicional**

El segundo modelo representa una planificación territorial tradicional donde los factores del desarrollo sostenible como la vinculación carretera, las zonas de crecimiento agrícola, las áreas

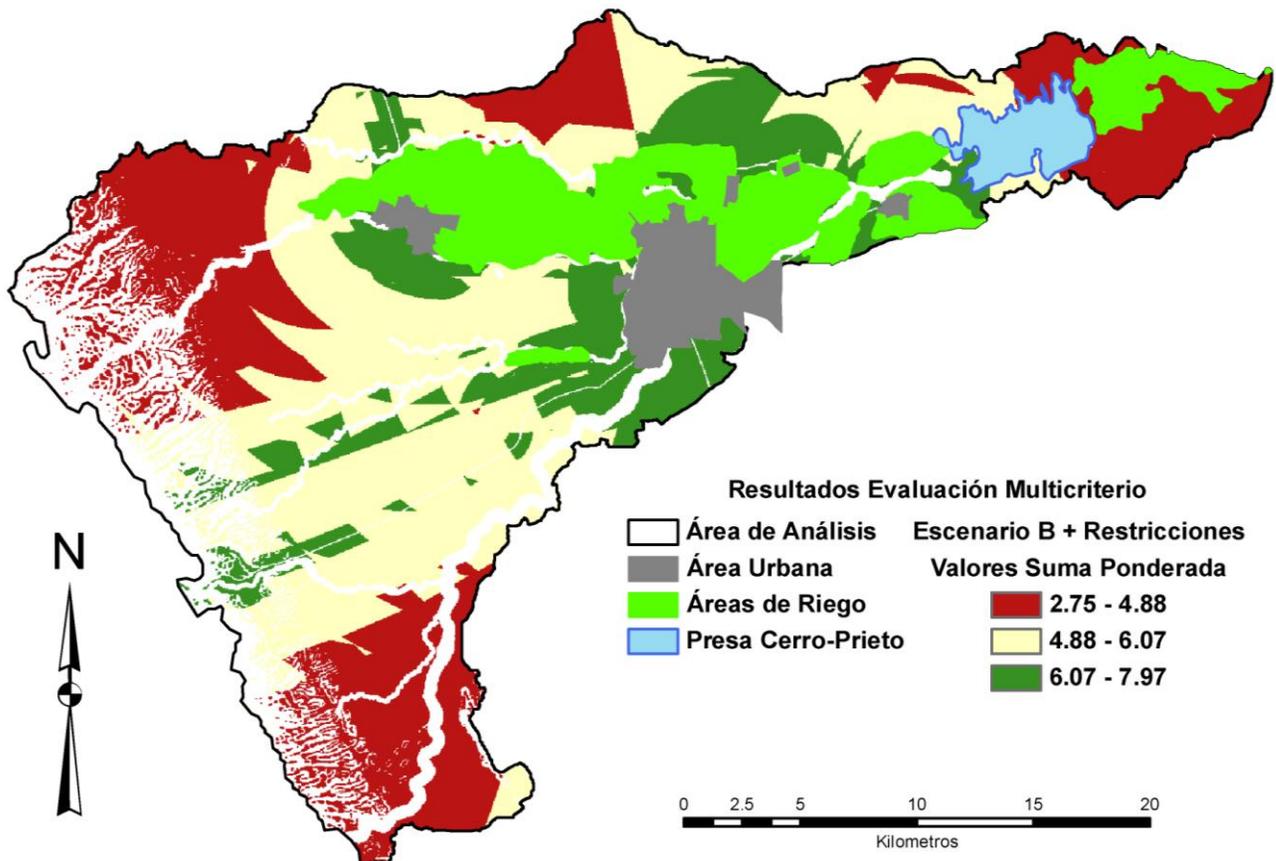
destinadas al crecimiento urbano y al incremento de la densidad poblacional, son las más importantes. Este modelo no considera la influencia que tiene la calidad del agua subterránea ni las características de vulnerabilidad de los acuíferos sobre los cuales se genera el desarrollo. Las preferencias del decisor brindan una preferencia preponderante a las actividades económicas. Este escenario para el desarrollo sostenible no hace hincapié en factores hídricos que están relacionados al desarrollo social y económico de las comunidades, debe ser visto como un escenario tradicional donde el tomador de decisiones o planificador no está consciente del papel que desempeñan las aguas subterráneas en el área investigada. La distribución de pesos de importancia reflejan la situación antes descrita donde un 25% de significación se consideraron para: la vinculación carretera, las zonas de crecimiento agrícola, las áreas destinadas al crecimiento urbano y al incremento de la densidad poblacional (Tabla 8.2).

En la Figura 8.8 se puede ver que los valores de baja sostenibilidad se incrementan en área y tienen valores más bajos iguales a 2.75 (color rojo al este, norte, noroeste y suroeste). Por otra parte, las puntuaciones obtenidas para las situaciones más sostenibles no superan los 7.97 puntos, indicando que son áreas con sostenibilidad a corto plazo condicionada.



**Figura 8.8** Situación para el Escenario B: Interacción de factores de influencia.

Las zonas con mayor sostenibilidad para este modelo se encuentran al suroeste, oeste y noreste de Linares y al suroeste y norte de Hualahuises como se muestra en la Figura 8.9. Una importante zona colindante a la Presa Cerro-Prieto tiene valores de sostenibilidad muy bajos entre 2.75 y 4.88 representando menos del 50% de sostenibilidad, hecho que puede significar un escenario de deterioro del agua de embalse destinada al consumo humano.

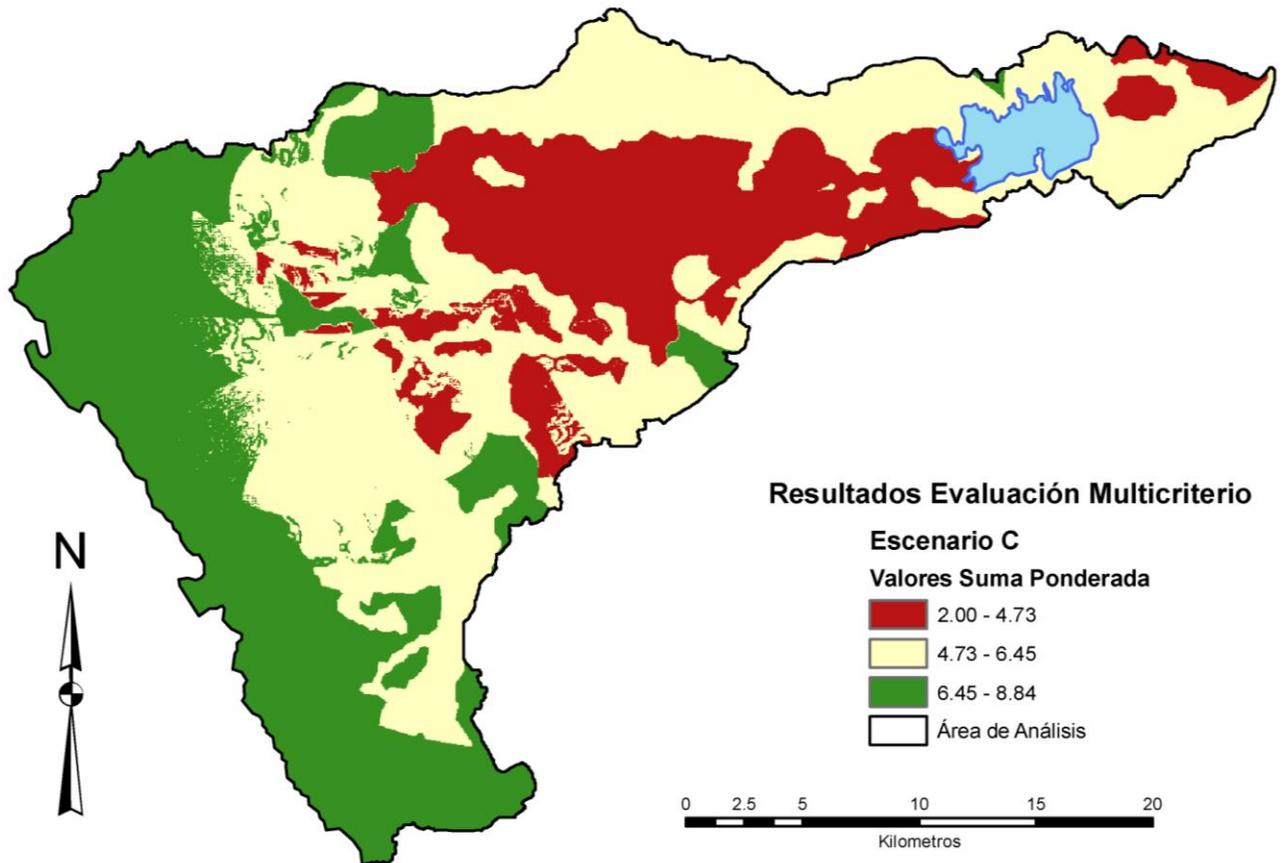


**Figura 8.9** Situación para el Escenario B: Modelo final donde se combinan factores de influencia y restricción.

***Escenario C: El desarrollo agrícola condicionado por el agua subterránea y la vulnerabilidad acuífera***

El tercer modelo enfatiza una planificación territorial que permite interactuar equitativamente a factores como la calidad del agua subterránea, la vulnerabilidad de los acuíferos y las zonas de crecimiento de la actividad agrícola. Este modelo no considera la influencia que tienen la vinculación carretera, el posible crecimiento de los centros urbanos y la densidad poblacional. Las preferencias del decisor están orientadas a generar y potenciar una mayor actividad agrícola, considerando que los recursos hídricos y su protección son importantes. La

distribución de pesos de importancia tiene un valor porcentual del 33.334% de significación equitativa para los factores involucrados en el cálculo del modelo espacial CMD (Tabla 8.2).

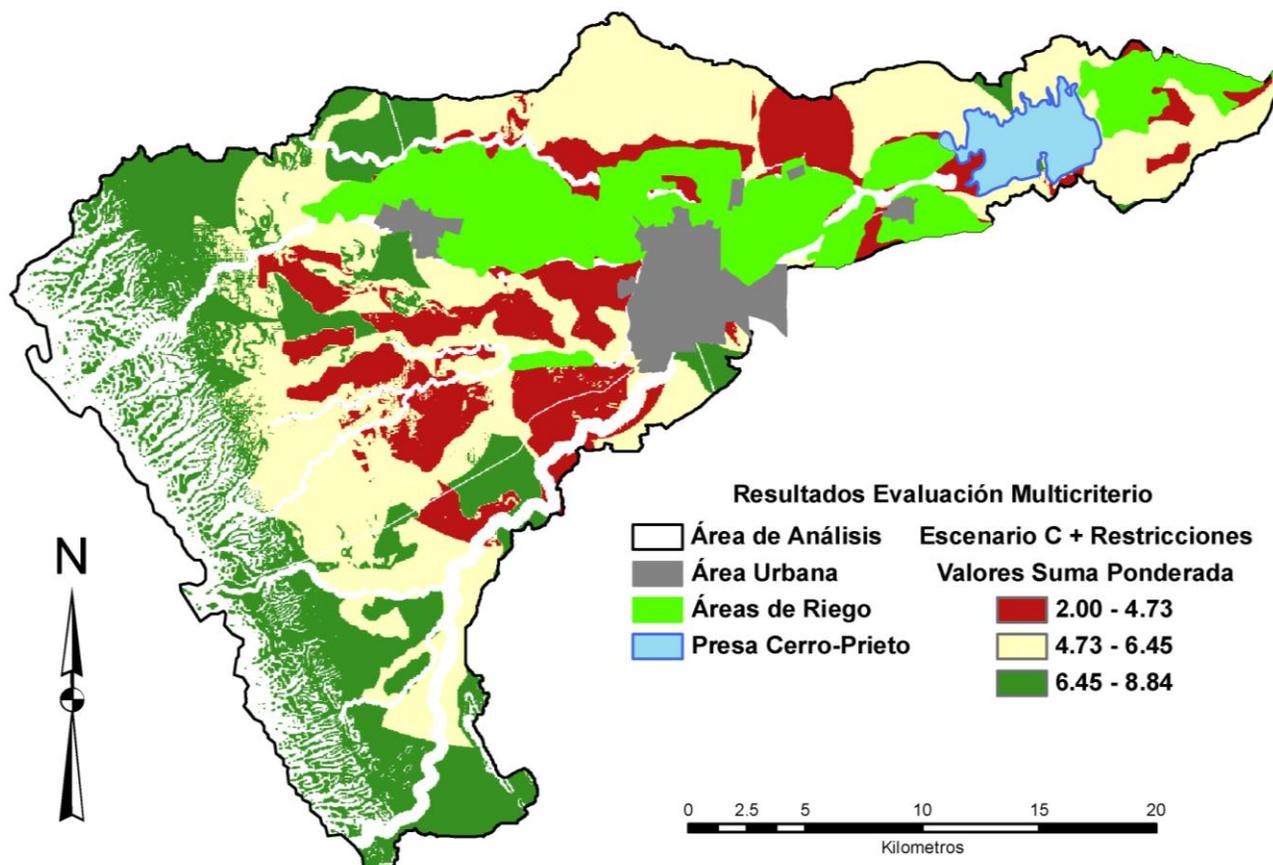


**Figura 8.10** Situación para el Escenario C: Interacción de factores de influencia.

Bajo esta configuración se presenta valores bajos de sostenibilidad (2.00 a 4.73, color rojo zona central), implicando una zonificación clara donde actualmente se encuentra la mayoría de las zonas de producción agrícola. Este modelo representa la importante conexión entre el agua subterránea y las actividades agrícolas. La zona con mayor índice de sostenibilidad están ubicados en la zona oeste de área de estudio (zonas de recarga) las cuales tienen valores calculados ente 6.45 y 8.84 (Figura 8.10).

Las restricciones juegan un papel significativo en este modelo, debido a que en las zonas con más alto índice de sostenibilidad se tiene restricciones debidas a la pendiente topográfica y llanuras de inundación principalmente, circundando a las zonas de riego actual y los centros urbanos se tiene un predominancia de áreas con bajo índice de sostenibilidad, adicionalmente en el borde este de la Presa Cerro-Prieto se evidencia la presencia de áreas con baja sostenibilidad,

hecho relevante si se toma en cuenta las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, hecho que supone un riesgo a la calidad fisicoquímica del agua del embalse (Figura 11).

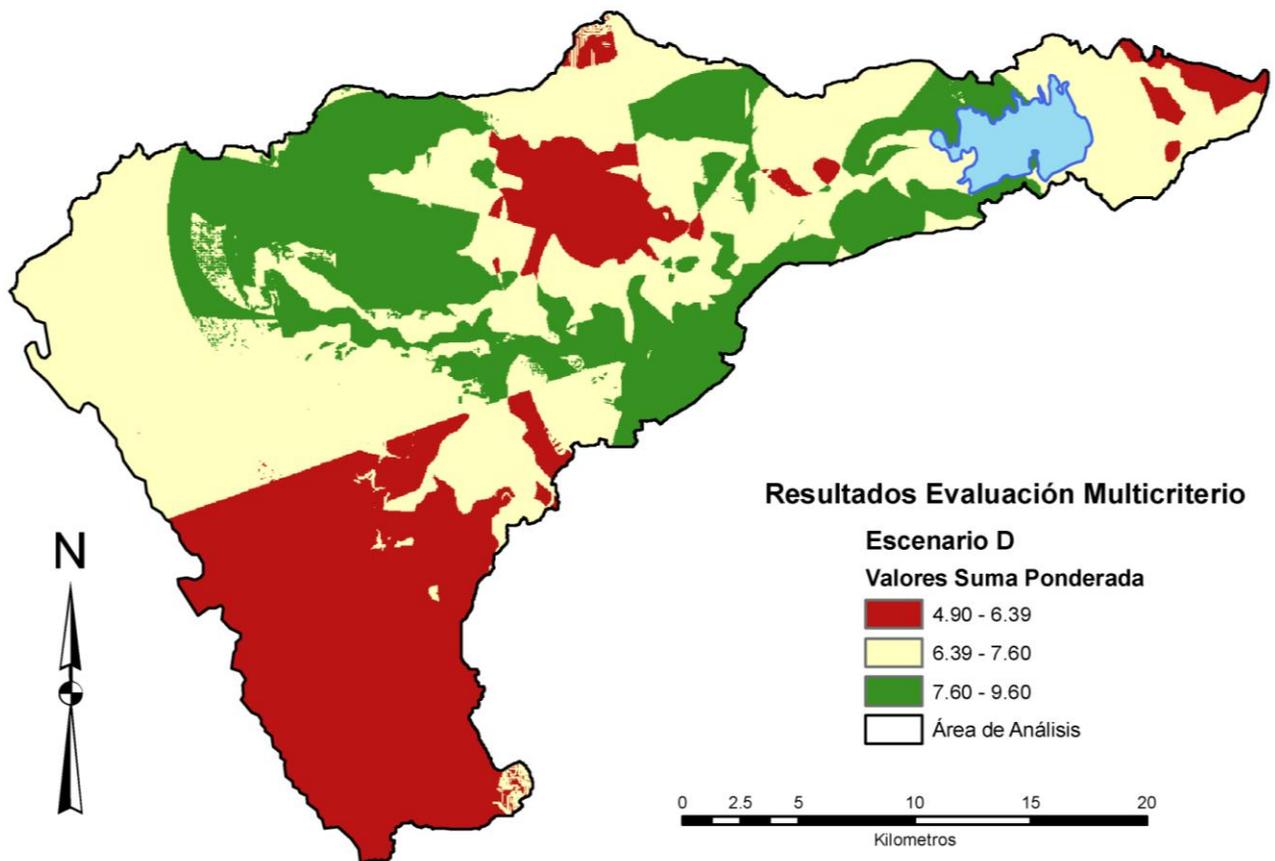


**Figura 8.11** Situación para el Escenario C: Modelo final donde se combinan factores de influencia y restricción.

**Escenario D:** *La relación entre el desarrollo urbano, la calidad del agua subterránea y la vulnerabilidad de los acuíferos*

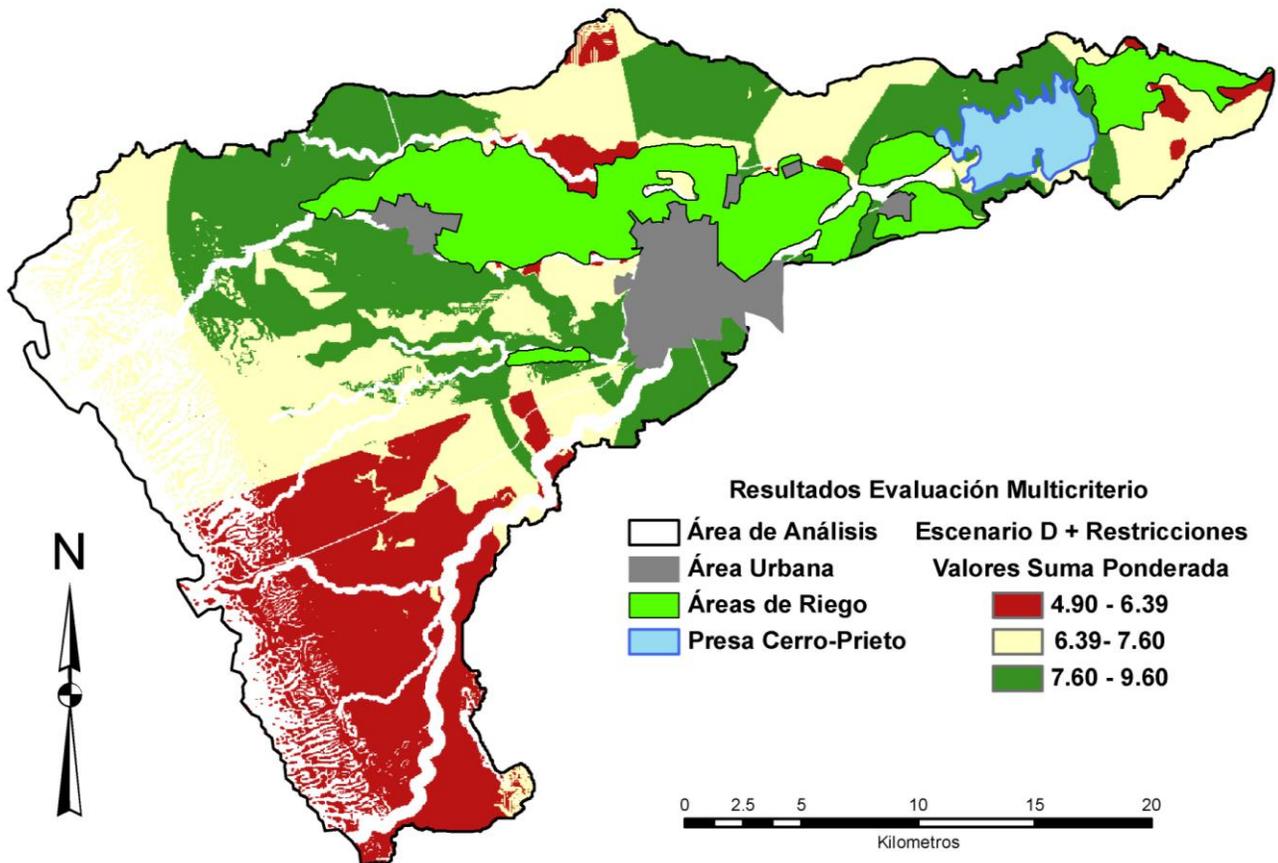
Para generar el cuarto modelo de planificación territorial se investigó la relación de los factores como la calidad del agua subterránea, la vulnerabilidad de los acuíferos, las áreas urbanas y su densidad poblacional para determinar los lineamientos de un posible crecimiento urbano de las ciudades al interior del área de estudio. No se tomó en cuenta la influencia que tienen la vinculación carretera y las zonas de riego. Las preferencias del decisor están orientadas a incentivar el crecimiento urbano, considerando que los recursos hídricos como fuente generadora de desarrollo. La distribución de pesos de importancia asignó un 30% al agua subterránea y los asentamientos humanos, un 20% a la vulnerabilidad acuífera y la densidad poblacional, finalmente un 0% a la vinculación carretera y zonas de riego (Tabla 8.2).

En esta situación se ve que la distribución de las tendencias de densidad poblacional son muy importantes, debido a que generan valores bajos de sostenibilidad donde se localizan la zonas de recarga y localización de materiales geológicos no consolidados (acuífero de poros), por tanto se demuestra el impacto de los seres humanos en el sistema natural. Los valores bajos de sostenibilidad (4.90 a 6.39, color rojo) no son extremos y están por encima del 50%. Los índices con mayores valores de sostenibilidad están ubicados al noroeste, sur y noreste del área de estudio (7.60 a 9.60) como se puede evidenciar en la Figura 8.12.



**Figura 8.12** Situación para el Escenario D: Interacción de factores de influencia.

Al integrar las restricciones del modelo con la ubicación de las ciudades de Linares y Hualahuises, se determinó que las zonas oeste y sur son las más adecuadas para el crecimiento físico de las ciudades, el sector noroeste de Hualahuises presenta valores altos de sostenibilidad. Sorprendentemente, se tienen valores altos en la periferia de la Presa Cerro Prieto, tanto las áreas al oeste como este del área de estudio tienen buena calidad de agua en sus fuentes (Figura 8.13).



**Figura 8.13** Situación para el Escenario D: Modelo final donde se combinan factores de influencia y restricción.

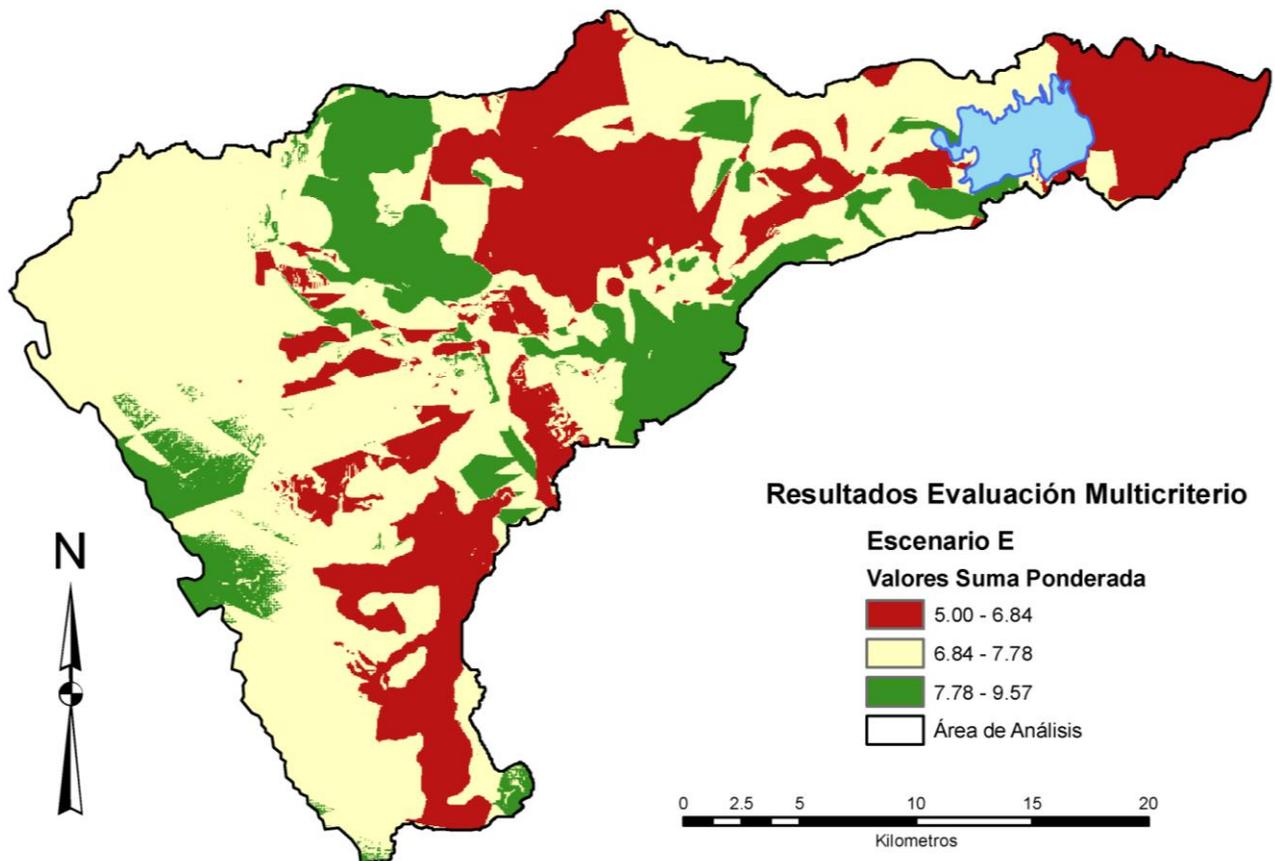
**Escenario E:** *La importancia de la Hidrogeología Urbana en el desarrollo sostenible de los usos de suelo*

El quinto modelo de planificación territorial representa la situación que incluye los conceptos de la Hidrogeología Urbana que permiten evaluar el desarrollo sostenible en el área de investigación.

Bajo estos conceptos, la calidad del agua subterránea y los asentamientos humanos son los generadores del desarrollo, la vulnerabilidad de los acuíferos es la medida que involucra el medio físico de las actividades humanas, por lo tanto es imprescindible su valoración. La distribución de la densidad poblacional se considera importante debido a su crecimiento constante y acelerado durante el último siglo, asimismo, la vinculación carretera permite la comunicación y comercialización de productos agrícolas, el abastecimiento de bienes y servicios y la movilización de personas, pero sin duda, en el área de estudio la mayor actividad económica es la producción agrícola, donde tradicionalmente se cultivan cítricos que tienen importantes zonas de riego.

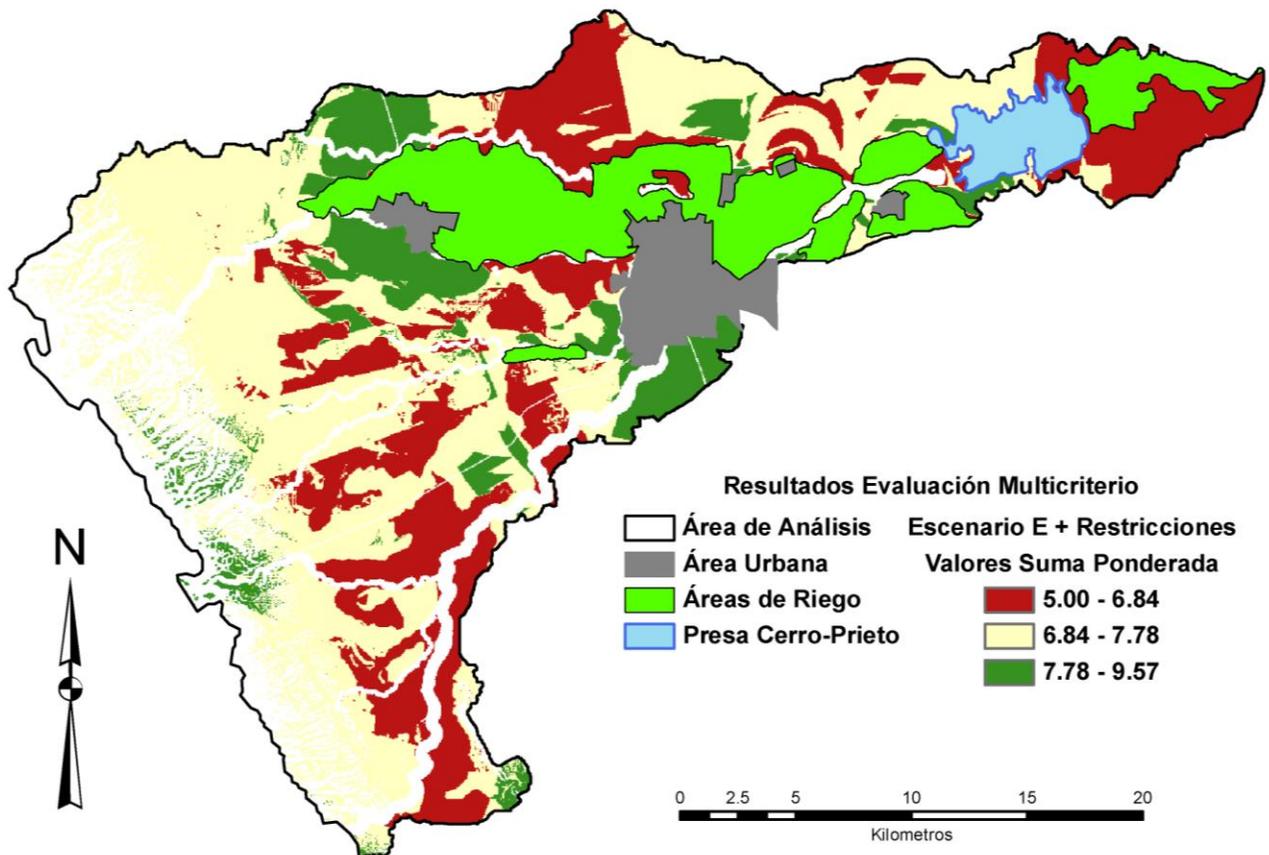
Las preferencias del decisor deben estar orientadas a fortalecer el bienestar social y económico de la población, incluyendo la explotación adecuada de los recursos disponibles en el área bajo análisis. Para el caso objeto de esta investigación, el agua subterránea se constituye en el principal recurso natural que genera crecimiento social y económico. Por las razones expuestas, la asignación de pesos de importancia está distribuida de la siguiente manera: 30% desarrollo de nuevas zonas de cultivo, un 25% representa la calidad del agua subterránea y los asentamientos humanos, el 20% significa la vulnerabilidad de los acuíferos, el 15% evidencia el posible crecimiento poblacional y finalmente un 10% está destinado al desarrollo de las vías de comunicación terrestre en la zona (Tabla 8.2).

El modelo obtenido se muestra en la Figura 8.14, lo interesante de este modelo es que identifica claramente una zona de baja sostenibilidad en el centro del área de estudio, la zona suroeste y el extremo este (aguas abajo de la Presa Cerro Prieto) también presentan valores altos (color rojo, con valores entre 5.00 y 6.84).



**Figura 8.14** Situación para el Escenario E: Interacción de factores de influencia.

Se identifican dos zonas con valores altos de sostenibilidad, ubicados en el sector sur y en el centro-oeste del área de estudio (color verde), los valores intermedios de sostenibilidad (6.84 y 7.78), se encuentran distribuidos circundando varias zonas pequeñas de sostenibilidad alta y baja, dicha situación predomina en la faja central desde el poniente hacia el oriente. En el borde oeste de la Presa Cerro Prieto se tiene la presencia de un sector con baja sostenibilidad justamente sobre el área por donde se conecta el cauce del Río Pablillo al vaso de captación de la presa, denotando un área conflictiva, hacia el sur de esta zona, están presentes valores altos de sostenibilidad, en el borde norte de la presa se tienen valores intermedios no significando mayor riesgo.



**Figura 8.15** Situación para el Escenario E: Modelo final donde se combinan factores de influencia y restricción.

La integración final de los resultados del análisis de factores influyentes con los factores restrictivos a través del análisis matemático de cartografía temática brinda una imagen más clara del modelo propuesto. Donde se tiene sostenibilidad al norte y al suroeste de la ciudad de Hualahuises y las actuales áreas con riego. En la zona sur y sur oeste de la ciudad de Linares, también se tienen valores altos de sostenibilidad, hacia la Presa Cerro Prieto, en dirección de los

Ejidos Rio Verde, La Escondida y Guadalupe, predominan valores bajos e intermedios de sostenibilidad (Figura 8.15).

#### 8.6.4.2 Evaluación final y recomendación para la decisión

La capa de salida de datos del *raster calculator* representa el modelo de desarrollo sostenible en una superficie continua. A través del análisis del modelo en cada modelo, se obtiene una comprensión más profunda del desarrollo sostenible y su extensión espacial para cada escenario. Las comparaciones entre los escenarios pueden servir para informar a las futuras decisiones de planificación que se deban tomar.

Los modelos desarrollados en el presente estudio, sirven para entender mejor la relación espacial entre los factores y variables contempladas en el análisis con el método de Criterios Múltiples de Decisión desarrollados en una plataforma SIG. La alternativa E es la que obtuvo mejor valoración numérica (rango entre 5.00 y 9.57), indicando una interacción racional, equitativa y responsable con las actividades propias de la zona de estudio. Esta opción es el resultado del análisis detallado de la información recopilada a lo largo de la investigación y es producto de un análisis numérico y de una evaluación razonada que enfatiza las principales variables del sistema.

## 8.7 CONCLUSIONES

Hay muchas razones validas para modelar el patrón espacial del desarrollo sostenible, a través de la representación espacial; el desarrollo sostenible se convierte en un concepto menos abstracto y en una entidad más tangible.

El proceso de selección y descripción de criterios, la elección de pesos de preferencia y la generación de un patrón espacial de los factores y variables, permite aclarar y entender mucho mejor el concepto a menudo confuso de la sostenibilidad.

El proceso de modelado permite al usuario inspeccionar el patrón espacial de cada uno de los factores individuales, ya sean limitantes o factores influyentes y descubrir cómo esos patrones interactúan para crear un punto de vista más objetivo del desarrollo sostenible.

En el contexto de planificación territorial, desarrollar modelos de los patrones espacial de desarrollo sostenible permite al usuario visualizar el cambio de sostenibilidad en el tiempo, también, permite visualizar el patrón de cambio a través de diferentes escenarios de planificación.

Las metodologías líderes actuales que evalúan el desarrollo sostenible, LEED y SSI, no ofrecen estas oportunidades para realizar un análisis espacial detallado.

La adaptabilidad y versatilidad de esta metodología demostrada con el análisis del área de estudio puede ser reproducida y aplicada en otras áreas o regiones sin ninguna restricción. Esta ventaja radica en su sólido proceso de análisis numérico y espacial por medio de la aplicación de tecnologías y procedimientos matemáticos versátiles y poderosos siendo ésta otra característica notable del modelo espacial con CMD.

La disponibilidad de datos y su acceso es una cuestión importante, debido a que se debe contar con una buena base de datos, lo cual permite realizar un sin número de interpretaciones semánticas de la sostenibilidad.

La metodología utilizada proporciona un método fácilmente adaptable y transparente para gestionar el desarrollo sostenible en casi cualquier lugar.

La introducción de conceptos de nuevas ramas científicas como lo es la Hidrogeología Urbana en los modelos de planificación y ordenamiento del territorio, demostró ser primordial en ambientes donde se explota agua subterránea y superficial.

Se demostró que la explotación de recursos hídricos es un factor esencial y clave para lograr el desarrollo sostenible de ciudades y comunidades con diversas actividades desarrolladas en espacios reducidos.

La validez y aplicabilidad de datos geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y sus métodos de análisis, son variables determinantes y sumamente importantes a la hora de planificar el uso de suelos, debido a que se encuentran directamente relacionados y las consecuencias de una mala gestión territorial se evidencia claramente en modelos de sostenibilidad que incluyan este tipo de geodatos.

La versatilidad de los SIG quedó comprobada una vez más. Esta tecnología permite el análisis claro, directo y eficiente de largas bases de datos, de su integración y su interacción en modelos que sirvan de herramientas claves para gestionar el desarrollo sostenible de los usos de suelo y la planificación territorial de áreas urbanas y rurales ó ambas, en un entorno digital y gráfico.

La aplicación de mapas temáticos digitales permite ver gráficamente de manera irrefutable las interacciones de procesos matemáticos que brindan mayor claridad en escenarios complicados donde existen varios factores y variables actuando sobre el mismo espacio físico del territorio.

Sin embargo, el patrón espacial generado en este proyecto no es una visión absoluta ni definitiva de la distribución espacial del desarrollo sostenible de la región de Linares, Nuevo León. El modelo espacial es una herramienta prescriptiva, útil en la orientación e introducción de nuevas variables en el análisis de la visualización del desarrollo sostenible que sirve para investigar e informar sobre la planificación del desarrollo futuro de una manera consistente y coherente.

Las superficies que obtuvieron altos valores de desarrollo sostenible deben ser investigadas con mayor detalle, así como factores no previstos ni considerados en el desarrollo del modelo espacial que podrían estar presentes, aclarando que ésta información es únicamente destinada a fines de investigación académica y científica. No es de ninguna manera una injerencia en las atribuciones de las autoridades locales, municipales, estatales, ni federales.

## 9. CONCLUSIONES GENERALES

La Cuenca Hidrológica del Río Pablillo, presenta una geología diversa y morfología muy marcada, debido a su localización sobre las provincias geológicas: la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo.

Se generó el Modelo Digital de Elevaciones para la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo y se analizó la red de drenaje y se determinaron las características climatológicas para la zona.

El balance hídrico realizado en la Cuenca Hidrológica del Río Pablillo evidenció que existe un déficit hídrico provocado por condiciones climatológicas semiáridas extremas características del noreste de México y predominantes en el área de estudio.

Las Formaciones geológicas predominantes en el área de estudio son: *Formación Méndez*, *Formación San Felipe* (Mesozoico) y los materiales conglomeraticos y aluviales del Terciario. Las direcciones de fracturamiento de la *Formación Méndez* presentan un sistema combinado: a) Sistema principal (dirección preferente entre 220° y 203° de azimut); b) Sistema secundario perpendicular al primero (dirección preferencial de 110° a 120° de azimut); c) Sistema terciario (dirección entre 280° a 290° de azimut) y d) Sistema cuaternario casi perpendicular al terciario (dirección preferencial de 190° a 200°).

Se evidenció la presencia de un acuífero semi-confinado, compuesto por dos importantes unidades hidroestratigráficas: *Formación Méndez* (acuífero de fracturas, profundidad >200 m.) en la base y los sedimentos aluviales y conglomerados (acuífero de poros, profundidad promedio de ~25 m.) que son más someros y sobreyacen al anterior. Los niveles piezométricos promedio son de ~10 m. Las direcciones preferentes de flujo están orientadas de SE a NW, coincidiendo con la dirección del sistema principal de fracturamiento de la *Formación Méndez*.

El análisis multivariado utilizado en el análisis de iones mayores, determinó importantes cambios en la calidad química del agua subterránea en un periodo de 28 años (1981-2009) y a lo

largo del recorrido de las líneas de flujo del agua subterránea. Altos contenidos de nitratos, sulfatos y cloruros denotan el impacto de las actividades humanas sobre los acuíferos de la cuenca.

La comparación de la calidad química del agua subterránea con la normas de la Organización Mundial de la Salud (WHO, World Health Organization), evidencian que varios de los parámetros analizados superan los límites máximos estipulados en la norma, evidenciando el alto riesgo a la que está expuesta la salud de los habitantes de Linares y su área conurbada.

La generación de mapas de vulnerabilidad de acuíferos aplicando el método DRASTIC en el Sistema de Información Geográfica demostró ser una tecnología de análisis muy importante, ya que permite conocer la interacción de los parámetros físicos de los acuíferos en un entorno digital.

La validación de los mapas de vulnerabilidad acuífera es posible usando los contenidos y la distribución de nitratos utilizados como trazador a lo largo del tiempo, de esta forma se integran los datos de la calidad hidrogeoquímica del agua subterránea con el medio físico que la contiene. El análisis de la distribución de la vulnerabilidad de los acuíferos evidencia que el agua subterránea puede ser afectada significativamente, demostrando la sensibilidad de este recurso, tanto en calidad como en cantidad.

La integración de la información del uso de suelo y la distribución de la vulnerabilidad acuífera, permitió definir zonas de riesgo a la contaminación. Si se realiza el caso de estudios desde el punto de vista de un análisis retrospectivo de la vulnerabilidad de los acuíferos es más útil ya que permite entender los procesos contaminantes y su evolución en el transcurso del tiempo.

La Hidrogeología Urbana es una nueva rama de la ciencia que permite estudiar el impacto de las ciudades y sus actividades antropogénicas en el sistema hidrogeológico natural.

El análisis de los resultados de la vulnerabilidad de acuíferos y de la Hidrogeología Urbana determino que los volúmenes de extracción, la distribución del agua por uso, la cobertura de los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario son variables relevantes y necesarias a la hora de evaluar las condiciones de aprovechamiento de recursos hídricos en medios urbanos.

La metodología que usa conceptos y datos de Hidrogeología Urbana para la planificación territorial del desarrollo sostenible de usos de suelo es válida y coherente. Su versatilidad y gran capacidad de asistir en el análisis de un número ilimitado de variables y factores la convierten en

una herramienta clave para gestionar el desarrollo sostenible en ambientes urbanos y rurales en Latinoamérica y en otras latitudes del planeta *Tierra*.

La utilización del concepto y metodologías de la Hidrogeología Urbana aplicada como parámetro de planificación territorial en el caso de la ciudad de Linares, Nuevo León, México, es la primera experiencia teórica y práctica de este tipo de investigación multidisciplinaria enfocada en el desarrollo sostenible del territorio.

## 10. REFERENCIAS

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D., y Gamal, M.**, 2008, Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys: *GPS solut*, v. 12, p. 23-32.
- Adatte, T., Stinnesbeck, W., Hubberten, H., y Remane, J.**, 1992, The Jurassic-Cretaceous boundary in Northeastern and central Mexico: A multistratigraphical approach., VIII Congreso Latinoamericano de Geología., Volume IV: Salamanca, p. 23-29.
- Adatte, T., Stinnesbeck, W., Hubberten, H., y Remane, J.**, 1994, Nuevos datos sobre el límite Jurásico/Cretácico en el Noreste y en el centro de México.: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.*, v. 52, p. 11-14.
- Adrian, O.G., Rudolph, D.L., y Cherry, J.A.**, 1999, The analysis of long term land subsidence near Mexico City: field investigations and predictive modeling: *Water Resources Research*, v. 35, p. 3327-3341.
- Ahmed, A.A.**, 2009b, Using Generic and Pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer: *Hydrogeology Journal*, v. 17, p. 1203-1217.
- Aichi, M.**, 2008, Coupled Groundwater Flow/Deformation Modelling for Predicting Land Subsidence, *in* Takisawa, S., ed., *Groundwater Management in Asian Cities: Japan*, Springer, p. 105-124.
- Al-Sefry, S.A., y Sen, Z.**, 2006, Groundwater rise problem and risk evaluation in major cities of arid lands- Jeddah Case in Kingdom of Saudi Arabia: *Water Resources Management*, v. 20, p. 91-108.
- Al-Zabet, T.**, 2002, Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using DRASTIC method.: *Environmental Geology*, v. 43, p. 203-208.
- Alvarado-Molina, J.B.**, 2004, Estudio mineralógico y geoquímico del NE de México en las formaciones La Casita, Taraises y Carbonera.: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México., Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.H., y Hackett, G.**, 1987, DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.: *Ada*, Oklahoma, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 157 pp p.
- Ames, D.P.**, 2002, Bayesian decision network for watershed management: Ph.D. Dissertation. Utah, USA, Utah State University.
- Aparicio-Mijares, F.J.**, 2007, *Fundamentos de Hidrología de Superficie.*, Editorial Limusa.
- Apodaca, L.E., Bails, J.B., y Smith, C.M.**, 2002, Water quality in shallow alluvial aquifers, Upper Colorado River Basin, Colorado, 1997: *Jour. Am. Water Res. Assoc.*, v. 38, p. 133-149.
- Appelo, C.A.J., y Postma, D.**, 2005, *Geochemistry, groundwater and pollution: Great Britain*, A.A. Balkema publishers, 649 p.
- Appleyard, S.**, 1995, The impact of urban development or recharge and groundwater quality in a coastal aquifer near Perth, western Australia: *Hydrogeology Journal*, v. 3, p. 65-75.
- Arentze, T.A., Borgers, A.W.J., y Timmerman, H.J.P.**, 1996, Integrating GIS into the Planning Process, *in* Fischer, M., Scholten, H.J., y Unwin, D., eds., *Spatial Analytical Perspectives on GIS* Londres, Taylor & Francis, p. 187-198.
- Aronoff, S.**, 1991, *Geographical Information System a Management Perspective*, WDL Publications.
- Arzate-Flores, J.A., Pacheco-Martínez, J., Del Rosal-Pardo, A., Barboza-Gudiño, R., Mata-Segura, J.L., y López-Doncel, R.**, 2006, Carta de riesgo de agrietamientos del área metropolitana de San Luis Potosí: *Geos*, v. 26.
- Atabey, E.**, 2005, Tibbi Jeoloji (medical geology), *in* Atabey, E., ed., *Publications of chamber of geology engineers of Turkey: Ankara*, TMMOB.
- Ator, S.W., y Denis, J.M.**, 1997, Relation of nitrogen and phosphorous in ground water to land use in four subunits of the Potomac River Basin, USGS Water-Resources Investigations Report, 97-4268, U.S. Geological Survey.

- Ávila-Olivera, J.A., y Garduño-Monroy, V.H.**, 2006, El abatimiento de los niveles freáticos es sólo un elemento en los procesos de subsidencia-creep-falla, caso: la ciudad de Morelia, Michoacán: Geos, v. 26.
- Bair, E. S., y Roadcap, G.S.**, 1992, Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: 1. Leaky-Confined Fractured-Carbonate Aquifer: Groundwater, v. 30, p. 199-211.
- Baker, L.A.**, 2009, The water environment of cities: St. Paul, MN, Springer, 301 p.
- Bakker, M., y Strack, O.**, 1996, Capture zone delineation in two-dimensional groundwater flow models: Water Resources Management, v. 30, p. 1309-1315.
- Barba-Romero, S., y Pomerol, J.C.**, 1997, Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica: Alcalá de Henares, Servicio de publicaciones de la Universidad de Alcalá.
- Barboza-Gudiño, R., Zavala-Monsiváis, A., Venegas-Rodríguez, G., y Barajas-Nigoche, L.D.**, 2010, Late Triassic stratigraphy and facies from northeastern Mexico: Tectonic Setting and provenance: Geosphere, v. 6, p. 621-640.
- Barredo-Cano, J.I.**, 1996, Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio: Madrid, RA-MA Editorial.
- Barredo, J.**, 1995, Aplicación de Técnicas de análisis Espacial Integrando Evaluación Multi-Criterio y sistemas de Información Geográfica para la Realización de Estudios de Localización /Asignación de Actividades: Tesis de Doctorado. Alcalá de Henares, España, Universidad de Alcalá de Henares.
- Bassington, F.C.**, 1990, Rising groundwater in the United Kingdom: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1, v. 88, p. 1037-1057.
- Berke, P.R., y Conroy, M.**, 2000, Are we planning for sustainable development?: Journal of the American Planning Association, v. 66, p. 21-33.
- Berke, P.R., y Kartz, J.**, 1995, Sustainable development as a guide to land use policy: Cambridge, MA: Research Paper, Lincoln Institute of land policy.
- Bitelli, G., Bonsignore, F., y Unguendoli, M.**, 2000, Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley: Journal of Geodynamics v. 30(3), p. 355-369.
- Bobba, A.G., Bukata, R.P., y Jerome, J.H.**, 1992, Digital processed satellite data as a tool in detecting potential groundwater flow systems: Journal of Hydrology, v. 131, p. 25-62.
- Bosque-Sendra, J.**, 1992, Sistemas de Información Geográfica: Madrid, Ed. rialp.
- Bosque-Sendra, J., y García, R. C.**, 2000, El uso de los Sistemas de Información Geográfica en la planificación territorial: Anales de Geografía de la Universidad Complutense, v. 22, p. 49-67.
- Bosque, J., García, F., Salado, E., y Jesús, M.**, 1994, Sistemas de Información Geográfica: prácticas con PC ARC/INFO e IDRISI Addison-Wesley Iberoamericana, RAMA.
- Bracken, I., y Webster, C.**, 1990, Information technology in Geography and planning. Including Principles of GIS: New York, Routledge.
- Brandon, P.S., y Lombardi, P.**, 2005, Evaluating Sustainable Development in the Built Environment: Oxford, Blackwell Science.
- Bronsveld, K., Huizing, H., y Omakupt, M.**, 1994, Improving land evaluation and land use planning: ITC Journal, v. 4, p. 359-365.
- Burrough, P.A., y McDonnell, R.A.**, 1998, Principles of geographic information systems: Oxford, U.K., Oxford University Press.
- Burrows, R.H.**, 1910, Geology of northern Mexico.: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana., v. 7, p. 85-103.
- Burston, M.V., Nazari, M.M., Bishop, P.K., y Lerner, D.N.**, 1993, Pollution of groundwater in the Coventry region (UK) by chlorinated hydrocarbon solvents: Journal of Hydrology, v. 149, p. 137-161.
- Butler, M.J., y Verhagen, B.T.**, 1997, Environmental isotopic tracing of water in the urban environment of Pretoria, South Africa, *in* Chilton et al, ed., Groundwater in the urban area: problems processes and management, 27th Cong. Int. Assoc. Hydrogeologists (IAH): Nottingham, p. 101-106.
- Cameron, E., y Peloso, G.F.**, 2001, An application of fuzzy logic to the assessment of aquifers' pollution potential: Environmental Geology, v. 40, p. 1035-1315.

- Campa, M.F., y Coney, P.J.**, 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1040-1051.
- Campos-Aranda, D.F.**, 2007, Escurrimiento: Estimación y aprovechamiento del escurrimiento, 440 p.
- Cebrián, J.A.**, 1988, Sistemas de Información Geográfica, *in* Bosque-Sendra, J.e.a., ed., Aplicaciones de la informatica a la geografía y ciencias sociales: Madrid, Síntesis.
- Cebrián, J.A.**, 1994a, GIS concepts: Cáceres, Fundicot.
- Cebrián, J.A.**, 1994b, La matriz geográfica, casi cuarenta años mas tarde, *Estudios geográficos*, Volume LV: Madrid, p. 183-190.
- Civita, M.**, 1994, Le Carte della vulnerabilit`a degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e Pratica [Contamination vulnerability mapping of the aquifer: theory and practice]. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*: Pitagora, Italy.
- Clark, I.D, y Fritz, P.**, 1997, Environmental isotopes in hydrogeology.: New York, NY, USA., Lewis Publishers.
- Clarke, R., y King, J.**, 2004, The Water Atlas, The New Press, 127 p.
- CNA, Comisión Nacional del Agua**, 1994, Diagnóstico de las acciones de saneamiento a nivel nacional.: México, CNA.
- CNA, Comisión Nacional del Agua**, 2007a, Base de datos hidrometeorológicos, estaciones climatologicas e hidrométricas ubicadas al interior de la Cuenca del Río Pablillo: Monterrey, Nuevo León, México.
- CNA, Comisión Nacional del Agua**, 2007b, Estadísticas del Agua en México: México, Comisión Nacional del Agua, 259 p.
- Cole, J.A.**, 1998, Water resources (introduction). *in* Herschy, R.W., y Fairbridge, R.W., eds., Enciclopedia of Hydrology and Water Resources: Boston, Kluwer Academic Publishers, p. 712-716.
- Conesa-García, C.**, 1996, Áreas de aplicación medioambiental de los 'SIG'. Modelización y avances recientes: *Papeles de Geografía* v. 23-24, p. 101-115.
- Cook, A.M., Scholtz, R., y Leisinger, T.**, 1988, Mikrobieller Abbau von halogenierten aliphatischen Verbindungen (Microbial degradation of halogenated aliphatic compounds): *GWF Wasser/Abwasser*, p. 61-68.
- CSD, Commission on sustainable Development.**, 2001, 9th. Session: New York.
- Custodio, E.**, 2002, Aquifer overexploitation: what does it mean?: *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 254-277.
- Custodio, E.**, 2004, Hidrogeología Urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica.: *Boletín Geológico - Minero*, v. 115, p. 283 - 288.
- Custodio, E., y Llamas, M.R.**, 1996, Hidrología Subterránea: Barcelona, España., Ediciones Omega, 1-1557 p.
- Chávez-Cabello, G., Cossio-Torres, T. , y Peterson-Rodriguez, R.H.**, 2004, Change of the maximum principal stress during the Laramide Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses.: *Geological Society of America Special Paper.*, v. 383, p. 145-159.
- Chen, C.T., Hu, J.C., Lu, C.Y., y Chan, Y.C.**, 2007, Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan: *Eng Geol*, v. 95, p. 30-47.
- Chilton, J. (Ed)**, 1999, Groundwater in the urban environment: Selected city profiles, vol. 2: Rotterdam, Balkema.
- Chow, V.T.**, 1964, Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill.
- Chow, V.T.**, 1966, Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill.
- Dangermond, J.**, 1987, The maturing of GIS an a new age for geographic information modelling systems (GIMS), *Proceedings, International Geographic Information Systems Symposium: The Research Agenda Volume 2*: Arlington, VA: NASA, p. 55-66.
- Danis, M**, 2005, Ithalat ve ithalatin dentimi, agir metal kirlilikleri (Import and control of import, heavy metal pollution), *Workshop of fertilizer and fertilizer raw materials*,: Diyarbakir, Publications of Chamber of Geology Engineers of Turkey TMMOB, p. 25-27.
- Davis, J.C.**, 1996, Statics and data analysis in geology: New York, Wiley.
- Davis, S.N., y De Wiest, R.J.M.**, 1971, Hidrogeología: Barcelona, España, Ediciones Ariel, 563 p.

- De Cserna, Z.**, 1956, Tectónica de la Sierra Madre Oriental de México, entre Torreón y Monterrey, México., XX Congreso Geológico Internacional, Mexico, D.F.: Instituto de Geología U.N.A.M., p. 87.
- De la Garza-González, S.I.**, 2000, Estudio geológico/hidrogeológico de la región citrícola Linares-Hualahuises, Nuevo León, NE-México.: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- De León-Gómez, H.**, 1993, Die Unterläufigkeit der Talsperre José López Portillo / Cerro Prieto auf einer Kalkstein - Mergelstein - Wechselfolge bei Linares, Nuevo León / México.: PhD Dissertation. Aachen, RWTH - Aachen
- De León-Gómez, H., Medina-Barrera, F., y Lizárraga-Mendiola, L.**, 2006, Elaboración de la matriz de geoindicadores ambientales en la presa José López Portillo (Cerro Prieto), fuente superficial de abastecimiento de agua potable de Monterrey, N.L., México: CIENCIA UANL, v. IX, p. 65-72.
- De León-Gómez, H., y Schetelig, K.**, 1996, Fracturamiento hidráulico en presas: Zbl. Geol. Paläont., v. Teil I, p. 1037-1043.
- De León-Gómez, H., Schetelig, K., y Meiburg, P.**, 1994, Abastecimiento de agua potable en el noreste de México. Ejemplo: Presa Cerro Prieto. [Water supply in northeast Mexico. Example: Cerro Prieto Reservoir] Zbl. Geol. Paläont., v. I, p. 593-602.
- De León-Gómez, H., Schetelig, K., Werner, J., Azzam, R., Masuch-Oesterreich, D., Medina-Barrera, F., Rangel-Rodríguez, M.M., Navarro-De León, I., y Salinas-Ramírez, J.O.**, 1998, Proyecto: Límites del abastecimiento de agua potable en el Noreste de México, objetivos y metas; (SIREYES/95/053). Project: Water supply limit in the northeast Mexico, objectives and scopes (SIREYES/95/053): Zbl. Geo. Paläont., v. Teil I, p. 511-518.
- DeMers, M.N.**, 2005, Geographic Information Systems: Enciclopedia Britannica.
- DeMers, M.N.**, 2009, Fundamentals of Geographic Information Systems: United States of America, Jhon Wiley & Sons, inc., 443 p.
- Dickinson, W.R., y Lawton, T.F.**, 2001, Carboniferous assembly and fragmentation of Mexico: GSA Bulletin, v. 113, p. 1142-1160.
- Dickinson, W.R., y Lawton, T.F.**, 2001, Carboniferous assembly and fragmentation of Mexico: GSA Bulletin, v. 113, p. 1142-1160.
- Domenico, P.A.**, 1972, Models and Concepts in groundwater hydrology.: New York, USA., McGraw-Hill Inc., 405 p.
- Doods, H.S.**, 2000, Pathways and paradigms for sustainable human communities, *in* Lawrence, R.J., ed., Sustaining human settlement: A challenge for the new millennium: Great Britain, Urban International Press.
- Downing, R.A.**, 1993, Groundwater resources, their development and management in the UK: an historical perspective.: Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology., v. 26, p. 335-358.
- Drangert, J.O., y Cronin, A. A.**, 2004, Use and abuse of the urban groundwater resource: Implications for a new management strategy.: Hydrogeology Journal, v. 12, p. 94-102.
- Drescher, H.**, 1995, Geologische und Hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, Nuevo Leon, Mexiko.: Diplomarbeit. Kiel, Christian Albrechts-Kiel Universität.
- Drewes, J.E., Heberer, Th., Rauch, T., y Reddersen, K.**, 2003, Fate of pharmaceutical during groundwater recharge: Ground Water Monitoring and Remediation v. 23, p. 64-72.
- Durazo, J., y Farvolden, R.N.**, 1989, The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations: Journal of Hydrology, v. 112, p. 171-190.
- Eguiluz de Antuñano, S., Arada-García, M., y Marrett, R.**, 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana A.C., v. 53, p. 1-26.
- Ekemen-Keskin, T.**, 2010, Nitrate and heavy metal pollution resulting from agricultural activity: a case study from Eskipazar (Karabuk, Turkey): Environmental Earth Science, v. 61, p. 703-721.
- Eldrandaly, K., Eldin, N., Sui, D., Shouman, M., y Nawara, G.**, 2005, Integrating GIS and MCDM using COM Technology: The International Arab Journal of Information Technology, v. 2, p. 162-167.

- Elhatip, H., Afsin, M., Kusu, L., Dirik, K., Kurmac, A., y Kavurmac, M.**, 2003, Influences of human activities and agriculture on groundwater quality of Kayseri-Incesu-Dokuzpinar springs, central Anatolian part of Turkey: *Environmental Geology*, v. 44, p. 490-494.
- Eriksson, E.**, 1985, *Principles and Applications of Hydrogeochemistry*: London 12, Chapman and Hall.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute**, 2009a, Arc Hydro Geoprocessing Tools - Tutorial: Redlands, ESRI 380 New York St.,.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute**, 2009b, Arc Hydro Tool - Tutorial Version 1.3: Redlands, ESRI 380, New York, St. .
- ESRI, Environmental Systems Research Institute**, 2009c, Welcome to ArcGIS Desktop Help 9.3, including 9.3.1, Volume 2010.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute**, 2010, ArcGIS Redlands, CA, USA., Environmental Systems Research Institute (ESRI).
- Ferrati, A., Prati, C., y Rocca, F.**, 2000, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 38, p. 2202-2212.
- Ferrati, A., Prati, C., y Rocca, F.**, 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, p. 8-20.
- Fetter, C.W.**, 2001, *Applied Hydrogeology*: Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice Hall, 598 p.
- Ford, M., y Tellam, J.H.**, 1994, Source, type and extent of inorganic contamination within the Birmingham aquifer system: *Journal of Hydrology*, v. 156, p. 101-135.
- Fortunato, K.S., y Ward, W.C.**, 1982, Upper Jurassic-Lower Cretaceous fan-delta complex: La Casita formation of the Saltillo area, Coahuila, Mexico: *Transactions-Gulf Coast Association of Geological Societies*, v. XXXII.
- Foster, S., Lawrence, A., y Morris, B.**, 2001, Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano: Evaluación de las necesidades de gestión y formulación de estrategias: Washington D.C., Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- Foster, S.S.D.**, 1987, Fundamental Concepts in Aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy., Volume 38: The Hague, Holland., TNO Committee on Hydrological Research Information, p. 69-86.
- Foster, S.S.D., y Chilton, P.J.**, 2004, Downstream of downtown: urban wastewater as groundwater recharge.: *Hydrogeology Journal*, v. 12, p. 115-120.
- Foster, S.S.D., Morris, B.L., y Lawrence, A.R.**, 1994, Effects of Urbanization on Groundwater Recharge, International Conference on Groundwater Problems in Urban Areas: London, Proceedings: Institution of Civil Engineers, p. 43-63.
- Freeze, R.A., y Cherry, J.A.**, 1979, *Groundwater*: New Jersey U.S.A., Prentice Hall.
- Fuge, R.**, 2004, Anthropogenic sources, *in* Olle, S., ed., *Essential of medical geology, impact of the natural environment on public health*, Elsevier, p. 43-60.
- Galván-Mancilla, S.M.**, 1996, Cartografía Hidrogeológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L.: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Gallego, M., Ramos, L., y Arambula, S.**, 2006, *Sistemas de Información Geográfica para la Optimización de la Administración Pública*, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.
- Galloway, D., Jones, D.R., y Ingebritsen, S.E.**, 1999, Land subsidence in the United States, *US Geological Survey Circular 1182*, p. 117.
- Gambolati, D., y Frezze, R.A.**, 1973, Mathematical simulation of the subsidence of Venice: theory: *Water Resources Research*, v. 9, p. 721-733.
- Garrett, P., Williams, J.S., Rossoll, C.F., y Tolman, A.L.**, 1989, Are ground water vulnerability classification system workable?, *FOCUS Conference on Eastern Regional Ground Water Issues*: Kitchener, Ontario, Canada, National Groundwater Association Columbus, p. 329-343.
- Garza-Jiménez, F.**, 1993, Mapeo Geológico en el área Purísima de Conchos, Linares, Nuevo León y análisis de sedimentos fluviales de los ríos Pablillo, Potosí, Anegado y Conchos en al misma área.: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México., Univesidad Autónoma de Nuevo León.

- Garza-Tamez, D.I.**, 2009, Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas en el sur del estado de Nuevo León: Tesis de licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Godfrey, S. , y Smith, M.**, 2005, Improved microbial risk assessment of groundwater.: *Hydrogeology Journal*, v. 13, p. 321-324.
- Goldhammer, R.K.**, 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico: Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico.: *Geological Society of America Special Paper.*, v. 340, p. 1-58.
- Goldhammer, R.K., Lehmann, E.T., Todd, R.G., Wilson, J.L., Ward, W.C. , y Johnson, C.R.**, 1991, Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico.: *Geological Society of North America Special Paper.*, v. 340, p. 1-58.
- Gómez-Piñeiro, F.J.**, 1992, Los Sistemas de Información Geográfica. Su importancia y utilidad en los estudios medioambientales: Cuadernos de Sección. Historia, v. 20, p. 455-465.
- Goodchild, M.F.**, 1987, A spatial analytical perspective on geographic information systems *International Journal of Geographic Information Systems*, v. 1, p. 327-334.
- Götte, M.**, 1988, Estudio geológico-estructural de Galeana/NL y sus alrededores.: *Actas Facultad Ciencias de la Tierra*, v. 3, p. 61-87.
- Greetman, S.**, 1999, Geographical Information Technology and Physical Planning, *in* Stillwell, J., Greetman, S., y Openshaw, S., eds., *Geographical Information And Planning*: Heidelberg, Springer-Verlag.
- Grillentine, John.**, 2000, Source Water Assessment and Protection Program., Volume Drinking Water Section: Santa Fe, New Mexico, USA., State of New Mexico Environment Department, p. 47.
- Grischek, T., y Nestler, W.**, 1996, Urban groundwater in Dresden, Germany: *Hydrogeology Journal*, v. 4, p. 48-63.
- Guo, F., Jiang, G., y Yuan, D.**, 2007, Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China: *Environmental Geology*, v. 53, p. 533-541.
- Gutiérrez-Alejandro, G.A.**, 2008, Análisis de microfacies de la transición formacional La Casita-Taraises y determinación del límite bioestratigráfico Jurásico-Cretácico en el cañón de Santa Rosa, Iturbide, Nuevo León.: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- HAL**, 2009, Honorable Ayuntamiento de Linares. Administración 2006-2009: Linares, Nuevo León.
- HAL**, 2010, Honorable Ayuntamiento de Linares. Administración 2009-2012: Linares, Nuevo León, Gobierno Municipal de Linares.
- Hall, M., Hall, C.A.S., y Taylor, M.**, 2000, Geographical Modeling-the synthesis of a GIS and simulation modeling., *in* Hall, C.A.S., ed., *Quantifying Sustainable Development*: San Diego, Academic press.
- Haghton, G.**, 1999, Environmental justice and the sustainable city, *in* Satterthwaite, D., ed., *Sustainable cities*: London, Earthscan.
- Hayashi, T.**, 2008, The Shallow Groundwater Environment and the Risk of Soil Liquefaction, *in* Takisawa, S., ed., *Groundwater Management in Asian Cities*: Japan, Springer, p. 81-103.
- He, Z.L., Yang, X.E., y Stoffella, P.J.**, 2005, Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment: *J trace Elem Med Biol*, v. 19, p. 125-140.
- Healey, P., y Shaw, T.**, 1993, Planners, plans and sustainable development: *Regional studies*, v. 27, p. 769-776.
- Hem, J.D.**, 1989, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, United States Geological Survey Water Supply Paper, 2254 p.
- Heras, R.**, 1979, Metodología y normas de cálculo de crecidas de proyectos, Métodos hidrológicos: Madrid, España, Centro de Estudios Hidrográficos, Dirección General de Obras Públicas p. 60.
- Hirata, R., Stimson, J., y Varnier, C.**, 2006, Urban Hydrogeology in Developing Countries: A Foreseeable Crisis, International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS): Alicante, España, Real Academia Española de Ciencias, p. 71-78.
- Hiscock, K.M.**, 2005, *Hydrogeology Principles and Practice*: MA USA, Blackwell Publishing, 389 p.
- Hoaglin, D.C., y Mosteller, F.**, 1983, *Understanding robust and exploratory data analysis*: New York, Wiley.

- Hodge, T.**, 2001, Towards a Conceptual Framework for Assessing Progress Towards Sustainability: Ecosystems, v. 4, p. 390-405.
- Hooker, P.J., McBridge, D., Brown, M.J., Lawrence, A.R., y Goody, D.C.**, 1999, An integrated hydrogeological case study of a post-industrial city in the West Midlands of England, *in* Chilton, J., ed., Groundwater in the urban environment: selected city profiles: Lisse, The Netherlands, Balkema, p. 145-150.
- Howard, K., Eyles, W.F., y Livingstone, S.**, 1996, Municipal landfilling practice and its impact on groundwater resources in and around urban Toronto, Canada: *Hydrogeology Journal*, v. 4, p. 64-78.
- Humphrey, W.E.**, 1949, Geology of the Sierra Los Muertos area, Mexico (with descriptions of Aptian cephalopods from the La Peña Formation): *Geological Society of America Bulletin*, v. 6, p. 80-176.
- Humphrey, W.E.**, 1956, Tectonic framework of Northeast Mexico: *Gulf Coast Association Geological Society Transaction*, v. 6, p. 25-35.
- Humphrey, W.E., y Diaz, T.**, 1954, Reconnaissance geology and road log of the Monterrey-Salttillo-Monclova highway., Volume Field trip guidebook., South Texas Geological Society., p. 21.
- Hurni, H.**, 2000, Assessing sustainable land management (SLM): *Agriculture Ecosystems & Environmental*, v. 81, p. 83-92.
- Hutchinson, M.F.**, 1988, Calculation of hydrologically sound digital elevation models, Third Symposium on Spatial Handling: Sydney, Australia.
- Hutchinson, M.F.**, 1989, A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits: *Journal of Hydrology*, v. 106, p. 211-232.
- Hutchinson, M.F., y Dowling, T.I.**, 1991, A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia.: *Hydrological Processes*, v. 5, p. 45-58.
- Huxhold, W.E.**, 1991, An introduction to urban geographic information systems: New York, Oxford University Press.
- Huxhold, W.E., y Levinsohn, AG.**, 1995, Managing geographic information system project: New York, Oxford University Press.
- Imlay, R.W.**, 1936, Evolution of the Coahuila peninsula, Mexico.: *Gulf Coast Association Geological Society Transaction*, v. 47.
- Imlay, R.W.**, 1937, Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico.: *Geological Society of America Bulletin*, v. 49, p. 539-602.
- Imlay, R.W.**, 1938, Studies of the Mexican Geosyncline.: *Geological Society of America Bulletin.*, v. 49, p. 1651-1694.
- Imlay, R.W.**, 1943, Jurassic Formations of gulf region.: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin.*, v. 27, p. 1407-1533.
- INEGI**, 1981, Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León: México, DF, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI**, 1982, Carta de Uso de Suelo y Vegetación (Linares G14C58) Escala 1:50000: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI**, 1983a, Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas (Linares G14-11). Escala 1:250000: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI**, 1983b, Carta Hidrológica de Aguas Superficiales (Linares G14-11). Escala 1:250000: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI**, 1999, Carta Topográfica (Linares G-14-C58). Escala 1:50000: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI**, 2005, Segundo Censo de Población y Vivienda: Proyecto IRIS-Science II.: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI**, 2006, Carta Topográfica (Linares G-14-11) Escala 1:250.000: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática** 1997, Estadísticas del Medio Ambiente (México): México, INEGI.

- IPCC, 2007, Climate change 2007. The Physical Science Basis United Kingdom, Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Izaguirre-Valdez, F., 2008, Estudio hidrogeofísico de la Presa José López Portillo (Cerro Prieto), noreste de México: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Jabareen, Y., 2008, A new conceptual framework for sustainable development: *Environ Dev Sustain*, v. 10, p. 179-192.
- Jamrah, A., Futaisi, A.A., Rajmohan, N., y Al-Yaroubi, S., 2007, Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment: *Environ Monit Assess*.
- Jankowski, P., 1995, Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods: *International Journal Geographical Information Systems*, v. 9, p. 251-273.
- Jarvis, K.E., Gray, A.L., y Houk, R.S., 1991, *Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*: Blackie, Glasgow, 392 p.
- Jenks, B.F., 1967, The Data Model Concept in statistical mapping: *International Yearbook of Cartography*, v. 7, p. 186-190.
- Jenson, S.K., y Domingue, J.O., 1988, Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis.: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, p. 1593-1600.
- Johnson, S.T., 1994, Keynote paper: Rising groundwater levels: engineering and environmental implications, in Wilkinson, W.B., ed., *Groundwater problems in urban areas*. Proceedings of the international conference organised by the Institution of Civil Engineers London, 2-3 Junes 1993, Thomas Telford, p. 285-298.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I., Ehrman, R.L., y Yamamoto, P.O., 1994, Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells Nebraska: *Ground Water*, v. 32, p. 31-34.
- KC, The Kohala Center, 2008, *Encyclopedia of Geographic Information Science*: Waimea Hawaii, SAGE Publications, 558 p.
- Kemper, K.E., 2004, Groundwater - from development to management: *Hydrogeology Journal*, v. 12, p. 3-5.
- Kessler, A., y Rubin, H., 1987, Relationships between water infiltration and oil spill migration in sand soils: *Journal of Hydrology*, v. 91, p. 187-204.
- Khan, N.U., y Hassan, Q., 2009, GIS and Its Applications - an Emerging Field: *Invertis Journal of Science & Tecnology*, v. 2, p. 190-195.
- Kim, J.S., Kim, D.J., y Kim, S.W., 2007, Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR: *Geoscience Journal*, v. 11, p. 59-73.
- Kim, Y., y Hamm, S., 1999, Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea: *Hydrogeology Journal*, v. 7, p. 227-235.
- Klimas, A., 1995, Impacts of urbanization and protection of water resources in the Vilnius district, Lithuania.: *Hydrogeology Journal*, v. 3, p. 24-35.
- Kontogianni, V., Pytharouli, S., y Stiros, S., 2007, Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly, Greece: *Environmental Geology*, v. 52, p. 1085-1095.
- Kozlowski, J., 1988, Planning research and education: looming perspectives: *Ekistics*, v. 55, p. 31-38.
- Krishna, A.K., y Govil, P.K., 2004, Heavy metal contamination of soil around Pali Industrial Area, Rajasthan, India: *Environmental Geology*, v. 47, p. 38-44.
- Kropp, W.W., 2010, *A Spatial Multicriteria Decision Analysis Approach for Evaluating Sustainable Development*: Master of Arts. Ohio, USA, Ohio University.
- Kumbur, H., Özsoy, H.D., y Özer, Z., 2008, Mersin İl'nde tarımsal alanlarda kullanılan kimyasalların su kalitesi üzerine etkilerinin belirlenmesi (Determination of the effects of chemical used in agricultural area on water quality in Mersin Province): *Cev-Kor Ekoloji*, v. 68, p. 54-58.
- Kuroda, K., y Fukushi, T., 2008, Groundwater Contamination in Urban Areas, in Takisawa, S., ed., *Groundwater Management in Asian Cities*: Japan, Springer, p. 126-149.

- Lamprey, B.L., Barron, E.J., y Pollard, D.**, 2005, Impacts of agriculture and urbanization on the climate of the Northeastern United States: *Global and Planetary Changes*, v. 49, p. 203-221.
- Larson, K.J., Basagaoglu, H., y Mariño, M.A.**, 2001, Prediction of optimal safe groundwater yield and land subsidence in the Los Baños-Kerrleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model: *Journal of Hydrology*, v. 242, p. 79-102.
- Laskar, A.**, 2003, Integrating GIS and Multicriteria Decision Making Techniques for Land Resource Planning: Master of Science in Geoinformatics. Enschede, The Netherlands, International Institute for Geo-information science and earth observation
- Leake, S.A.**, 1997, Title of subordinate document, Land Subsidence from ground-water pumping U.S. Geological Survey. Impact of Climate Change and Land Use in the Southwestern in the United States.
- Lee, S.**, 2003, Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in southern Korea: *Environmental Geology*, v. 44, p. 654-664.
- Lenz, R.J.M., y Beuttler, A.**, 2003, Experiences with GIS-based planning tool for spatial eco balances: *Environmental Modeling & Software*, v. 18, p. 581-585.
- Lerner, D.N.**, 1989, Groundwater recharge in urban areas: *Atmospheric Environment*, v. 24B, p. 29-33.
- Lerner, D.N.**, 1990, Recharge due to urbanization *in* Lerner, D.N., Issar, A.S., y Simmers, I., eds., *Groundwater recharge - A guide to understanding and estimating natural recharge*, Volume 8, International Association of Hydrogeologists, p. 201-214.
- Lerner, D.N.**, 2004, *Urban Groundwater Pollution*, Taylor & Francis, 243 p.
- Lerner, D.N., y Barrett, M.H.**, 1996, Urban groundwater issues in the United Kingdom: *Hydrogeology Journal*, v. 4, p. 80-89.
- Lerner, D.N., Halliday, D., y Hoffman, J.M.**, 1994, The impact of sewers on groundwater quality *in* Wilkinson, W.B., ed., *Groundwater problems in urban areas* Volume 64-75: London, Thomas Telford.
- Lerner, D.N., Issar, A.S., y Simmers, I.**, 1990, *Groundwater Recharge: Hannover, Germany*, International Association of Hydrogeologists, 345 p.
- Linsley, JR., R.K., Kohler, M.A., y Paulhus, J.L.H.**, 1977, *Hidrología para ingenieros: México*, McGraw-Hill, p. 386.
- Lizárraga-Mendiola, L.G.**, 2003, Análisis y evaluación del agua subterránea del área del tiradero municipal y La Petaca, Linares, N.L. México.: Tesis de Maestría. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Lizárraga-Mendiola, Liliana, De-León Gómez, Héctor, Medina-Barrera, Francisco, y Návar, Jesús**, 2004, Evaluation of the impacted aquifer by the landfill of Linares, Mexico: *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, v. 236, p. 225-244.
- Lobo-Guerrero, A.**, 2003, Effects of aquifer overexploitation on the surface infrastructure in the Bogota Sabana (Colombia): *RMZ-Materials and Geoenvironment, Bled-Ljubjana*, v. 50, p. 193-196.
- Lofgren, B.L.**, 1969, Field measurements of aquifer-system compaction, the San Joaquin Valley, California, *in* Tison, J.L., ed., *Land subsidence*, vol 1, International Association of Scientific Hydrology Publication, p. 272-284.
- López-Oliva, J.G.**, 1989, Biostratigraphie des Ober-Jura der Unter-kreide in der Sierra del Fraile, Nuevo León, Mexico: Diplomarbeit. Hamburg, Universität Hamburg.
- López-Ramos, E.**, 1980, *Geología de México tomo II: Provincia VI Noreste de México*, Instituto de Geología de la U.N.A.M., 454 p.
- López-Ramos, E.**, 1982, *Geología de México; Provincia VI Noreste de México: México*, D. F., Edición Escolar.
- Llamas, M.R., y Custodio, E.**, 2003, Intensive use of groundwater: challenges and opportunities Balkema, Lisse, p. 1-471.
- Lloyd, J.W., y Heathcote, J.A.**, 1985, *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater, an introduction*: Oxford 126, Clarendon Press, 305-339 p.
- Maguirre, D.J., Goolchild, M.F., y Rhind, D.W.**, 1991, *Geographical Information Systems: Principles and applications* (2 volumes): Harlow, U.K., Longman Scientific and Technical.
- Malczewski, J.**, 1999, *GIS and Multicriteria Decision Analysis*: New York, Wiley & Sons.

- Manta, D.S., Angelone, M., Bellanca, A., Neri, R., y Sprovein, M.**, 2002, Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy: *Sci Total Environ*, v. 300, p. 229-243.
- Mao, Y.Y., Zhang, X.G., y Wang, L.S.**, 2006, Fuzzy pattern recognition method for assessing groundwater vulnerability to pollution in the Zhangji area.: *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, v. 7, p. 1917-1922.
- Marble, D.**, 1990, Geographic Information Systems: An Overview, *in* Peuquet, D., y Marble, D., eds., *La Geografía y los modelos socioeconomicos*: Madrid, IEAL.
- Margat, J.**, 1968, Vulnèrabilitè des nappes d'eau souterrune à la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. *Bases de al cartographie (Doc.) 68 SGC 198HYD*, BRGM: Orleans, France.
- Martínez-Limas, N.A., y Gómez-Alejandro, A.G.**, 2008, Formación San Felipe: Caracterización Mineralógica y Geoquímica de Rocas Clásticas en la Parte Norte de la Sierra Madre Oriental, NE de México: Tesis de Licenciatura. Linares, N.L., México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Martínez-Vallejo, F.S.**, 2007, Análisis de las Filtraciones Laterales de la Presa José López Portillo/Cerro Prieto; Linares, Nuevo León, México: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Maslow, A.**, 1937, The comparative approach to social behavior: *Journal of Social Forces*, v. 15, p. 487-490.
- Maslow, A.**, 1943, A theory of human motivation: *PSYCHOLOGICAL REVIEWS*, v. 50, p. 370-396.
- McBride, M.B.**, 2004, Molybdeum, sulfur, and other trace elements in farm soils and forages after sewage sludge application *Commun Soil Sci Plant Anal*, v. 35, p. 517-535.
- McLay, CDA., Dragden, R., Sparling, G. , y Selvarajah, N.**, 2001, Predicting groundwater nitrate concentrations in a region for mixed agricultural land use: a comparison of three approaches.: *Environmental Pollutant*, v. 115, p. 191-204.
- Meiburg, P.**, 1987, Paleogeografía y desarrollo estructural del Cretácico de la Sierra Madre Oriental Septentrional, México.: *Actas Facultad Ciencias de la Tierra*, v. 2, p. 197-199.
- Melloul, A. J., y Collin, M.**, 1998, A propoused index for aquifer waterquality assessment: the case of Israel's Sharon region.: *Journal of Environmental Management*, v. 54, p. 131-142.
- Melloul, A.J., y Collin, M.**, 2001, A hierarchy of groundwater management, land-use, and social needs integrated for sustainable resource development: *Environment, Development and Sustainability*, v. 3, p. 45-59.
- Membratu, D.**, 1998, Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review: *Environmental Impact Assessment Review*, v. 16, p. 498-520.
- Mena-Frau, C., Gajardo-Valenzuela, J., y Ormazábal-Rojas, Y.**, 2006, Modelación espacial mediante Geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial: *Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá*, v. 14, p. 81-89.
- Mendoza, J.A., y Barmen, G.**, 2006, Assessment of groundwater vulnerability in the Río Antiguas, Nicaragua: *Environ Geol*, v. 50, p. 569-580.
- Merchant, J.**, 1994, GIS-based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model.: *Photogram Eng Remote Sensing*, v. 60, p. 1117-1127.
- Michalzik, D.**, 1986b, Stratigraphy and Paleogeography of the Northeastern Sierra Madre Oriental, Mexico (Triassic - Lowermost Cretaceous): *Zbl. Geo. Paläont*, v. 1, p. 1161-1169.
- Michalzik, D.**, 1987, Sedimentación y sucesión de facies en un margen continental pasivo del Triásico al Cretácico Temprano del Noreste de la Sierra Madre Oriental, México.: *Actas Facultad Ciencias de la Tierra*, v. 2, p. 27-31.
- Michalzik, D.**, 1988, Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexiko. Fazielle Entwicklung eines passiven kontinentalrandes.: *Alemania., Technische Hochschule Darmstadt*.
- Michalzik, D., y Schumann, D.**, 1994, Lithofacies relationships and paleoecology of a Late Jurassic to Early Cretaceous fan delta to shelf depositional system in the Sierra Madre Oriental of northeast Mexico.: *Sedimentology*, v. 41, p. 463-477.

- Mikayilov, F.D, y Acar, B.**, 1998, Toprak ekosistemlerinde kirleticilerin tasnim mekanizmasinin incelenmesi ve modellenmesi (Investigation and modelling of contaminant's movement processes within the soil ecosystems: Cev Kor v. 28, p. 20-23.
- Mitchell, G.**, 1996, Problems and Fundamentals of Sustainable Development Indicators: Sustainable Development, v. 4, p. 1-11.
- Mixon, R.B., Murray, G.E., y Díaz, T.**, 1959, Age and correlation of Huizachal group (Mesozoic) state of Tamaulipas, Mexico: Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, v. 43, p. 757-771.
- Mohrlok, U., Wolf, L., y Klinger, J.**, 2008, Quantification of infiltration processes in urban areas by accounting for spatial parameter variability: Journal Soils Sediments, v. 8, p. 34-42.
- Moldes, F, J.**, 1995, Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica: Madrid, RAMA.
- Molina, J.S., García-Aróstegui, J.L, Benavente, J., Varela, C., De la Hera, A., y López-Geta, J.A.**, 2009, Aquifers overexploitation in SE Spain: A proposal for the integrated analysis of water management: Water Resources Management, v. 23, p. 2737-2760.
- Montalvo-Arrieta, JC, Quintanilla, Y., Tamez, A., Meneses, M., Ramos, L., y Masuch, D.**, 2005, Microzonation of the Linares, Northeast Mexico area, based on geology and shear-wave velocity measurements: Geofísica Internacional, v. 44, p. 331-340.
- Moreno-Esparza, L.**, 2009, Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en la región de Linares mediante el Método DRASTIC: Engineering. Linares, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Moreno-Jiménez, A.**, 2008, Sistemas y Análisis de la Información Geográfica: Manual de autoaprendiz con ArcGIS: México, RA-MA editorial, 908 p.
- Morris, B.L., Darling, W.G., Cronin, A.A., Rueedi, J., Whitehead, E.J., y Gooddy, D.C.**, 2006, Assesing the impact of modern recharge on a sandstone aquifer beneath a suburb of Doncaster, UK: Hydrogeology Journal, v. 14, p. 979-997.
- Muir, J.M.**, 1936, Geology of The Tampico Region, Mexico: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists., p. 280.
- Nagarajan, R. , Rajmohan, N., Mahendran, U., y Senthamikumar, S**, 2010, Evaluation of groundwater quality and its sustentability for drinking and agricultural use in Thanjavur city, Tamil Nadu, India: Environ Monit Assess, v. 171, p. 289-308.
- Navarro-De León, I.**, 2005, Análisis de estrategias de manejo integral del agua subterránea mediante modelación de flujo: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México: Doctorado en Ciencias. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México.
- NCGIA**, 1990, Core Curriculum. National Center for Geographic and Analysis: Santa Barbara.
- Ng, A.H.M., Chang, H.Ch., Zhang, K., Ge, L., y Rizos, Ch.**, 2009, Land subsidence monitoring in Australia and China using Satellite Interferometry, *in* Sideris, M.G., ed., Observing our Changing Earth, International Association of Geodesy Symposia 133.
- Nouri, J., Mahvi, A.H., Babaei, A.A., Jahed, G.R., y Ahmadpour, E.**, 2006, Investigation of heavy metals in groundwater: Park J Biol Sci, v. 9, p. 377-384.
- NU, Naciones Unidas.**, 1992, Agenda 21, United Nations Sustainable Development, United Nations Conference on Environment & Development, Volume Conferencia: Rio de Janeiro, Brazil, Naciones Unidas, p. 351.
- NU, Naciones Unidas.**, 2000, 55/2 Declaración del Milenio, *in* Asamblea General, S.d., Sesión Plenaria, ed., Volume A/RES/55/2\*, Naciones Unidas, p. 10.
- NU, Naciones Unidas.**, 2003, 57/253 Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, Volume A/RES/57/253, p. 3.
- O'Shea**, 1993, Discussion on rising groundwater levels, *in* Wilkinson, W.B., ed., Groundwater in urban areas: London, Thomas Telford, p. 363-364.
- Ochoa-González, G.H., y Carreón-Freyre, D.C.**, 2006, Influencia de la variación de las propiedades hidráulicas del medio geológico en el análisis de deformación diferencial: Geos, v. 26.
- Ortigosa, G.R., De Leo, G.A., y Gatto, M.**, 2000, VVF: Integrating modeling and GIS in a software tool for habitat suitability assessment: Environmental Modeling & Software, v. 15, p. 1-12.

- Pacheco-Martínez, J., Arzate-Flores, J.A, Arroyo-Contreras, M., Zermeño de León, M., y Mendoza-Otero, E.**, 2006a, Estimación del ancho de influencia de un fallamiento superficial: *Geos*, v. 26.
- Pacheco-Martínez, J., Arzate-Flores, J.A, Barboza-Gudiño, R., López-Doncel, R., Mata-Segura, J.L., y Del Rosal-Pardo, A.**, 2006b, Carta de hundimientos del área metropolitana de San Luis Potosi a partir de un modelo de subsidencia basado en el concepto de esfuerzos efectivos *Geos*, v. 26.
- Padilla y Sánchez, R.J.**, 1982, *Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, Mexico*: Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
- Padilla y Sánchez, R.J.**, 1985, Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, Estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí.: *Revista del Instituto de Geología. UNAM*, v. 6, p. 1-20.
- Padilla y Sánchez, R.J.**, 1986, Post-Paleozoic Tectonic of Northeast Mexico and its Role Evolution of the Gulf of Mexico.: *Geofísica Internacional*, v. 25, p. 157-207.
- Padilla y Sánchez, R.J.** , 1978, *Geología y estratigrafía (Cretácico Superior) del límite suroeste del estado de Nuevo León.*: *Revista del Instituto de Geología. UNAM*, v. 2, p. 37-44.
- Panagopoulos, G.P. , Antonakos, AK. , y Lambrakis, N.J.**, 2006, Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS.: *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 894-911.
- Panchow, J.F., y Cherry, J.A.**, 1996, *Dense Chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater*: Portland Oregon, Waterloo Press.
- Parent, P., y Church, R.**, 1987, Evaluation of GIS as decision making tools: *GIS'87*, v. 1, p. 63-71.
- Parris, T.M., y Kates, R.**, 2003, *Characterizing and Measuring Sustainable Development: Annual Review Environmental Resources*, v. 28, p. 559-586.
- Pearce, D., Barbier, E., y Markandya, A.**, 1990, *Sustainable development: Economics and environment in the third world*: London, Earthscan Publications.
- Pearce, D., y Turner, R.K.**, 1990, *Economics of natural resources and the environment*: Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Pettit, C., y Pullar, D.**, 1999, An integrated planning tool based upon multiple criteria evaluation of spatial information: *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 23, p. 339-357.
- Pettit, C., y Pullar, D.**, 2009, *Introduction to Urban and Regional Planning Using ArcGIS 9*, ESRI.
- Phien-wej, N., Giau, P.H., y Nutalaya, P.**, 2006, Land subsidence in Bangkok, Thailand: *Eng Geol*, v. 82, p. 187-201.
- Piper, A.M.**, 1994, A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis.: *Am Geophys Union Trans*, v. 25, p. 914-928.
- Pohl, C.A., y Jhonsdon, E.L.**, 1980, Ion Chromatography - the state of the art: *J. Chromatography*, v. Science, p. 442-452.
- Poland, J.F.**, 1982, *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.*: IH, USA, UNESCO.
- Porrás-Vázquez, N.D.**, 2008, *Análisis estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el área cañón Santa Rosa, Linares, N.L.*: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Prado-Gómez, E.**, 1997, *Aplicación de Métodos Geofísicos (SEV's) para investigar zonas de gravas en el área de Hualahuises-Linares, N.L., México*: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Pretty, J.N.**, 1996, *Sustainability works: UNEP. Our planet*, v. 8, p. 19-22.
- Price, M.O., y Reed, D.W.**, 1989, The influence of mains leakage and urban drainage on groundwater levels beneath conurbations in the UK: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1*, v. 86, p. 31-39.
- Priemus, H.**, 2005, How to make housing sustainable? The Dutch experience: *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 32, p. 5-19.

- Quintanilla-López, Y.**, 2005, Microzonación de la región de Linares, N. L., basada en la geología y velocidades de propagación de ondas sísmicas: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Rahnama, M.B., y Moafi, H.**, 2009, Investigation of land subsidence due to groundwater withdraw in Rafsanjan plain using GIS software: Arab J Geosci, v. 2, p. 241-246.
- Rajmohan, N., Al-Futaisi, A., y Al-Touqi, S.**, 2009, Geochemical process regulating groundwater quality in a coastal region with complex contamination sources: Barka, sultanate of Oman: Environmental Earth Sciences, v. 59, p. 385-398.
- Ramos-Leal, J.A., y Rodríguez-Castillo, R.**, 2003, Acuífero vulnerabilidad mapping in the Turbio River Valley, Mexico: A validation study.: Geofísica Internacional, v. 42, p. 141-156.
- Reyes-Reyna, G.**, 2000, Evaluación de la desertificación en la Subcuenca "Rio Limón" de Nuevo León mediante Sistemas de Información Geográfica.: Tesis de Maestría en Ciencias. Linares, Mexico, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Reynolds, J.H., y Barrett, M.H.**, 2003, A review of the effects of sewer leakage on groundwater quality: J Chart Inst Water E, v. 17, p. 34-39.
- Riecke, R.**, 1995, Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, Nuevo León, Mexiko.: Diplomarbeit. Kiel, Deutschland., Christian Albrechts - Kiel Universität.
- Robinson, J.**, 2004, Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development: Ecological Economics, v. 48, p. 369-384.
- Rodríguez-Pascual, A.**, 1993, Proposición de una definición profunda de SIG, Los sistemas de Información Geográfica en el umbral del siglo XXI. 2do. Congreso de la Asociación Española de Sistemas de Información Geográfica: Madrid, 1993.
- Rodríguez de Barbarín, C.O. , y Barbarín-Castillo, J.C.**, 1993, Influencia de la geología regional, ciclos estacionales y los asentamientos humanos en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca de Linares-Cerro Prieto, N.L., México.: Geofísica Internacional, v. 32, p. 221-235.
- Rojas-Ruiz, G., y Méndez-Delgado,** 1986, Consideraciones sobre el comportamiento de pozos hidrológicos en terrenos impermeables en la Planicie frente a la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, México.: Actas Facultad Ciencias de la Tierra, v. 1, p. 88-101.
- Romero, C.**, 1993, Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones: Madrid, Alianza editorial.
- Roseland, M.**, 2000, Sustainable community development: Integrating environmental, economic and social objectives Progress in Planning, v. 54, p. 73-132.
- Rosen, L.**, 1994, A study if the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions: Ground Water, v. 32, p. 278-285.
- Ruiz-Martínez, M.A.**, 1990, Zur Gliederung Verbreitung und Ökologischen Bewertung der Böden in der Region von Linares, N.L. Mexiko.: Diplomarbeit. Göttingen, Deutschland., Georg-August-Universität Göttingen.
- Ruiz-Martínez, M.A., y Werner, J.**, 1997, Research into the quaternary sediments and climatic variations in NE Mexico.: Quaternary International, v. 43/44, p. 145-151.
- Sachs, W.**, 1999, Planet dialectics: Exploring in environment & development, Fernwood Publishing, Witwatersrand University Press, Zed Books.
- SADM, Servicios de Agua y Drenaje Monterrey,** 2007, Base de datos municipio Linares.
- Salama, R.B., Tapley, I., Ishii, T., y Hawkes, G.**, 1994, Identification of areas of recharge and discharge using Landsat-TM satellite imagery and aerial photography mapping techniques: Journal of Hydrology, v. 162, p. 119-141.
- Salvador, A.**, 1987, Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of the Gulf of Mexico Basin: American Association of Petroleum Geologists Bulletin., v. 71, p. 419-451.
- Sánchez-Villa, X.**, 2004, Hidrogeología urbana: algunos efectos específicos.: Actualidad y recursos de las ciencias ambientales. Ecotropía. En Portada, v. 41.

- Santana-Salas, A.L.**, 2008, Bioestratigrafía de la transición formacional La Casita-Taraises (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) en el cañón El Novillo, Iturbide, N.L.: Tesis de Licenciatura. Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Schellekens, G.A.P.**, 1974, Olieverontreiniging pompstation Geulhen: H2O, v. 7, p. 140-143.
- Schirmer, M., y Butler, B.J.**, 2004, Transport behaviour and natural attenuation of organic contaminants at spill sites: *Toxicology*, v. 205, p. 173-179.
- Schmidt, R.**, 1986, Desarrollo de una plataforma carbonatada durante el Cretácico Inferior en el noreste de México.: *Actas Facultad Ciencias de la Tierra*, v. 1, p. 42-48.
- Scholten, H., y Van Der Vlugt, M.**, 1990, A Review of Geographic Information Systems applications in Europe, *in* Worrall, L., ed., *Geographic Information Systems, Development & Applications*: Londres, Belhaven Press, p. 13-40.
- Schwille, F.**, 1975, Groundwater pollution by mineral oil products: IAHS-AISH, v. Publ No 103.
- Seaber, P.R.**, 1988, Hydrostratigraphic units, *in* Back, W., Rosenshein, J.S., y Seaber, P., eds., *The Geology of North America, Volume O-2, Hydrogeology*: Boulder, CO, USA, The Geological Society of America, p. 9-14.
- Secunda, S., Collin, M., y Melloul, A. J.**, 1998, Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive land use in Israel's sharon region: *Environmental Management*, v. 54, p. 39-57.
- Sedlock, R.L., Ortega-Gutiérrez, F., y Speed, R.C.**, 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico: *GSA Special Paper*, v. 278, p. 153.
- Shanahan, P.**, 2009, Groundwater in the urban environment, *in* Baker, L.A., ed., *The water environment of cities*: Washington, DC, Springer, p. 29-48.
- Sharifi, M.A., y Retsios, V.**, 2003, Site selection for waste disposal through Spatial Multiple Criteria Decision Analysis. Unpublished paper presented in: III International Conference on Decision Support for Telecommunications and Information Society: Warsaw, Poland.
- Sharp, J.M., Christian, L.N., Garcia-Fresca, B., Pierce, S.A., y Wiles, T.J.**, 2006, Changing recharge and hydrogeology in an urbanizing area - example of Austin, Texas, USA, *Philadelphia Annual Meeting, Volume 38*: Philadelphia, Geological Society of America, Abstract with programs p. 289.
- Sharp, J.M., Krothe, J.N., Mather, J.D., Garcia-Fresca, B., y Stewart, C.A.**, 2003, Effects of urbanization on groundwater systems, *in* A., R., ed., *Earth Science in the city*: Washington, DC, American Geophysical Union, p. 257-278.
- Shen, Y.**, 2008, Groundwater Resources in Urban Water Management, *in* Takisawa, S., ed., *Groundwater Management in Asian Cities: Japan*, Springer, p. 35-59.
- SRH, Secretaria de Recursos Hidráulicos**, 1972, Proyecto de zonas de riego.
- Stenger, D.B., O'Reilly, S., y O'Halloran, J.**, 2006, Contaminants and Pollutants, *in* Davenport, J., y Davenport, J.L., eds., *The Ecology of Transportation: Managing, Mobility for the Environment*: Netherlands, Springer, p. 361-389.
- Store, R., y Kangas, J.**, 2001, Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitable modeling: *Landscape and Urban Planning*, v. 55, p. 79-93.
- Stuyfzand, P.J.**, 1999, Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow.: *Hydrogeology Journal*, v. 7, p. 15-27.
- Takisawa, S.**, 2008a, Groundwater Use and Management in Urban Areas, *in* Takisawa, S., ed., *Groundwater Management in Asian Cities: Japan*, Springer, p. 13-33.
- Takisawa, S.**, 2008b, Introduction, *in* Takisawa, S., ed., *Groundwater management in Asian Cities: Japan*, Springer, p. 3-11.
- Tarback, E.J., y Lutgens, F.K.**, 2005, *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*.
- Tellam, J.H., Rivett, M.O., y Israfilov, R.G.**, 2006, Towards management and sustainable development of urban groundwater systems, *in* Tellam, J.H., Rivett, M.O., Israfilov, R.G., y Herringshaw, L.G., eds., *Urban Groundwater Management and Sustainability: The Netherlands*, Springer, p. 493.

- Thirumalaivasan, D., Karmegam, M., y Venugopal, K.**, 2003, AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS: *Environmental Geology*, v. 18, p. 645-656.
- Thompson, M., y Walsh, J.N.**, 1989, *A Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*: Blakie, Glasgow, 254 p.
- Todd, D.K., y Mays, L.W.**, 2005, *Groundwater hydrology*: Hoboken, N.J., John Wiley & Sons, Inc., 636 p.
- Tolimson, R.F.**, 1984, *Geographic Information Systems: the new frontier: The operational geographer*, v. 5, p. 31-35.
- Torres-Alfosea, F.J.**, 1995, Aplicación de un sistema de información geográfica al estudio de un modelo de desarrollo local. Crecimiento urbano-turístico de Torre-Vieja (1956-1993): Alicante, España, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante.
- Tóth, J.**, 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins: *Journal of Geophysical Research*, v. 68, p. 4795-4812.
- Tóth, J.**, 1984, The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater., *in* Hitchon, B., y Wallick, E.I., eds., *Proc. of the first canadian/american conference on hydrogeology.*, Volume 3: Practical applications of ground water geochemistry.: Worthington, Ohio, USA., p. 3-39.
- Tóth, J.**, 2000, The key to improvements in aquifer protection: Analytical hydrogeology., *in* Perrochet, P., y Bouzelboudjen, M., eds., *Ecoulement et transport en milieux fortement hétérogènes. Troisième Cycle Romand en Sciences de la Terre*, Université de Neuchâtel, Institut de Géologie, Centre d'Hydrogéologie, 17-19 April Neuchâtel, 12p, p. 17-19.
- Tóth, Jozsef**, 1999, Groundwater as a geological agent: an overview of the causes, processes and manifestations: *Hydrogeology Journal*, v. 7, p. 1-14.
- Toussaint, B.**, 1994, Umweltproblematik und Hydrogeologie der Erkundung von Böden - und Grundwasser-Kontaminationen durch leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (Environmental problems and hydrogeology of investigation of soil and groundwater contamination by halogenated organic volatiles), Hessische Landesanstalt für Umwelt, 327 p.
- UNCED**, 1992, Agenda 21, United Nations Conference on Environment and Development New York.
- UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y Cultura.**, 2003, *Water for People, Water for Life: Executive Summary of the UN World Water Development Report*: Paris Francia, UNESCO, 575 p.
- USGBC**, 2005, LEED for New Construction Reference Guide. Version 2.2.
- Van Lier, H.N.**, 1994, Land use planning in perspective of sustainability: an introduction, *in* Van Lier, H.N., Jaarsma, C.F., Jurgens, C.R., y De Buck, A.J., eds., *Sustainable land use planning*: Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., y Wasseernaar, L.**, 1992, AVI: A method for groundwater Protection mapping in the Prairie Province of Canada, Volume PPWB Report: Saskatoon Saskatchewan, Canada., National Hydrology Research Institute.
- Vanloo, R., DeBorger, R., Voets, J.P., y Verstraete, W.**, 1975, Soil and groundwater contamination by oil spills-problems and remedies: *Int J Environ Stud*, v. 8, p. 99-111.
- Vázquez-Suñe, E.**, 2003, *Urban Groundwater. Barcelona City case study.*: Doctoral Thesis. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Vázquez-Suñe, E., Sánchez-Vila, X., y Carrera, J.**, 2005, Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain.: *Hydrogeology Journal*, v. 13, p. 522-533.
- Vázquez-Suñe, E., Castillo, O., Sánchez-Vila, X., Albreich, C., y Carrera, J.**, 2000, Use of anthropogenic to identify sources of groundwater recharge in urban areas in Barcelona, *in* A. D., ed., *Tracers and modeling in hydrogeology*: IAHS Wallingford, U.K., IAHS Publ., p. 363-369.
- Vázquez-Suñe, E., Sánchez-Vila, X., y Carrera, J.**, 1999, Gestión de las aguas subterráneas en zonas urbanas, conceptualización y modelación: aplicación a Barcelona (España): *Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica*, p. 153-160.

- Vbra, J., y Zaporozec, A.**, 1994, Guidebook on mapping groundwater vulnerability.: Heise, Hannover, Germany.
- Wang, Y., Merkel, B.J., Li, Y., Ye, H., Fu, S., y Ihm, D.**, 2007, Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China.: *Environmental Geology*, v. 53, p. 479-484.
- Welty, C.**, 2009, The urban water budget, *in* Baker, L.A., ed., *The water environment of cities*: Washington, DC, Springer, p. 17-27.
- Werner, Jörg**, 1996, Introducción a la Hidrogeología: Monterrey, NL, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, 174 p.
- Wheeler, S.**, 2000, Planning for Metropolitan Sustainability *Journal of Planning Education and Research*, v. 20, p. 133-144.
- WHO, World Health Organization, y UNICEF**, 2000, Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report, WHO Press, 80 p.
- Wilkinson, W.B.**, 1994, Groundwater problems in urban areas: London, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, 453 p.
- Williams, G.R.**, 1950, Hydrology, *in* Rouse, H., ed., *Engineering Hydraulics*: New York, U.S.A., Jhon Wiley & Sons, Inc., p. 229-320.
- Wolf, L., Klinger, J., Hötzl, H. , y Mohrlök, U.**, 2007, Quantifying mass fluxes for urban drainage systems to the urban soil-aquifer system: *Journal Soils Sediments*, v. 7, p. 85-95.
- Won, T.S.**, 1974, A study on maximum flood discharge formulas, Design of water resources projects with inadequate data, Volume 2: Paris, France, UNESCO-WMO-IAHS, p. 635-647.
- Younger, P.L.**, 2007, *Groundwater in the Environment*: MA, USA, Blackwell Publishing, 318 p.
- Yutsis, V., De León-Gómez, H., Masuch-Oesterreich, D., y Izaguirre-Valdez, F.**, 2007, Geological-geophysical study of Cerro Prieto water reservoir, NE Mexico.: *Water Resources Management* (en prensa).
- Yutsis, V.V., Jenchen, U., De León-Gómez, H., y Izaguirre-Valdéz, F.**, 2009, Paleogeographic development of the surroundings of Cerro Prieto water reservoir, Pablillo basin, NE Mexico, and geophysical modeling of the reservoir subsurface: *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, v. 253, p. 41-59.
- Zaadnoodijk, W.J., Van Den Brink, C., Vn Den Akker, C., y Chambers, J. ,** 2004, Values and functions of groundwater under cities, *in* Lerner, D.N., ed., *Urban Groundwater Pollution* New York, Taylor & Francis, p. 1-28.
- Zhang, A.G., y Wei, Z.X.**, 2005, *Land subsidence in China Shanghai*: Science and Technology Press, Shanghai.
- Zhang, Y., Xue, Y.Q., Wu, J.W., Shi, X.Q., y Yu, J.**, 2010, Excessive groundwater withdrawal and resultant land subsidence in the Su-Xi-Chang area, China: *Environmental Earth Science*, v. 61, p. 1135-1143.
- Zoller, U., Goldenberg, L.C., y Melloul, A.J.**, 1998, Shortcut-enhanced contamination of the Garza Strip Coastal aquifer: *Water Research Journal*, v. 32, p. 1779-1788.