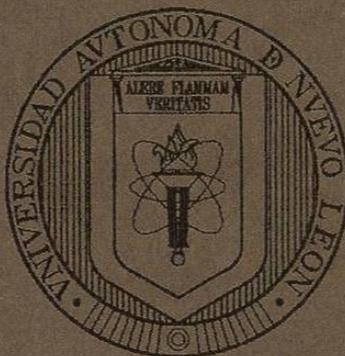


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**Perfil Químico de la Precipitación a Través del Dosel de Cuatro
Especies de Leguminosas de una Plantación en Linares, N.L.**

TESIS DE MAESTRIA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

POR

JORGE MENDEZ GONZALEZ

Linares, Nuevo León, México

Octubre, 1997

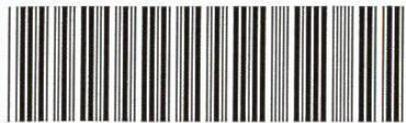
TM

Z5991

FCF

1997

M4



1020120343

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**Perfil Químico de la Precipitación a Través del Dosel de Cuatro
Especies de Leguminosas de una Plantación en Linares, N.L.**

TESIS DE MAESTRIA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

POR

JORGE MENDEZ GONZALEZ

Linares, Nuevo León, México

Octubre, 1997

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

**Perfil Químico de la Precipitación a través del Dosel de Cuatro
Especies de Leguminosas en una Plantación en Linares, N.L.**

TESIS DE MAESTRIA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIAS FORESTALES

POR

JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ

COMITÉ DE TESIS

Ph. D. Humberto González Rodríguez
Presidente

Dr. Pedro A. Domínguez Calleros
Secretario

Ph. D. José de Jesús Nívar Cháidez
Vocal

Dr. Marco Vinicio Gómez Meza
Asesor externo

DEDICATORIA

A Dios:

*Por darme la vida y permitirme realizar mis anhelos e ilusiones.
Gracias por estar siempre en mi camino*

A mi Madre:

Amparo González Corrales, gracias a aquella mujer dulce que siempre luchó para ver mis metas realizadas, a aquella que sonó un día este momento de triunfo. Hoy, le dedico este esfuerzo, ya que con su lucha diaria, mantuvo una fuerza en mí para poder desafiar los retos y adversidades.

A mi Padre:

Rafael Méndez González a quien admiro y respeto por ser un hombre humilde, de buena fe y gran corazón, gracias a él que siempre luchó por darme lo mejor, gracias por todas esas cosas que nunca terminaré de agradecer.

A mis Hermanos:

Rafael, Julieta, Ana María, Eduardo, Nolberto, Francisco, Elsa y Teresa, a quien en todos los momentos tuve presentes, gracias por ese cariño y por toda esa confianza.

DEDICATORIA

A Dios:

*Por darme la vida y permitirme realizar mis anhelos e ilusiones.
Gracias por estar siempre en mi camino*

A mi Madre:

Amparo González Corrales, gracias a aquella mujer dulce que siempre luchó para ver mis metas realizadas, a aquella que sonó un día este momento de triunfo. Hoy, le dedico este esfuerzo, ya que con su lucha diaria, mantuvo una fuerza en mí para poder desafiar los retos y adversidades.

A mi Padre:

Rafael Méndez González a quien admiro y respeto por ser un hombre humilde, de buena fe y gran corazón, gracias a él que siempre luchó por darme lo mejor, gracias por todas esas cosas que nunca terminaré de agradecer.

A mis Hermanos:

Rafael, Julieta, Ana María, Eduardo, Nolberto, Francisco, Elsa y Teresa, a quien en todos los momentos tuve presentes, gracias por ese cariño y por toda esa confianza.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) que gracias a su apoyo fue posible realizar mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, que por medio de la Facultad de Ciencias Forestales, hizo de mi un profesionista responsable y de firme decisión.

Al Dr. Humberto González Rodríguez, director de esta tesis, que gracias a su tiempo, dedicación y perseverancia, así como su constante apoyo, tanto material como moral, fue posible la culminación de este trabajo. Así mismo, quiero agradecerle por sus comentarios constructivos, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias que fueron para mi una base sólida para mi formación profesional.

Al Dr. Pedro Antonio Domínguez Calleros, asesor y revisor de esta tesis, ya que con su valiosa colaboración y apoyo brindado en todos los aspectos, sirvió para concluir este trabajo. Quiero también agradecerle por brindarme una mano amiga y permitirme formar parte de su noble confianza.

Quiero agradecerle al Dr José de Jesús Návar Cháidez, asesor y revisor de este trabajo, por dedicar su valioso tiempo a mejorar el desarrollo de esta investigación y por preocuparse de hacer de mí, un profesionista capaz y firme al igual que todos sus estudiantes. Así mismo, quiero darle gracias ya que siempre fue una persona de apoyo perdurable hacia mi, dentro y fuera del plantel escolar.

Al Dr. Marco Vinicio Gómez Meza, (Profesor de la Facultad de Economía, UANL), asesor y revisor de este trabajo quien siempre mostró su mejor postura, dedicación y firmeza, en la colaboración y asesoría de esta tesis, gracias por su importante apoyo en los análisis estadísticos de esta investigación. Gracias también por brindarme su valiosa amistad.

A mi novia Paulina Bazaldúa Sánchez que gracias a ella fue posible salir avante dentro y fuera de la escuela. Gracias por ese apoyo moral, que me brindaste, ya que fuiste la compañera de mis triunfos y derrotas. Gracias por tus comentarios que fueron el arma para enfrentar las adversidades.

Agradezco sinceramente a todas aquellas personas que participaron y me brindaron su ayuda en los análisis de laboratorio y de campo, los cuales fueron muy valiosos para soporte de este trabajo, ellos fueron: Elsa D. González, Laura B. Rodríguez, Yadira Garza Correa, Sanjuanita Doria, Alma Delia Ramírez, Ma. del Refugio Bravo Garza, Don Lázaro Ramírez y Don Manuel Hernández.

A Nancy Gutiérrez, Miguel Pérez Rodríguez, Hector G. Medrano "Junior" y Roberto Montezco, por brindarme su ayuda especial y oportuna durante el desarrollo de esta investigación, gracias también por brindarme esa amistad incomparable.

Agradezco también a mis compañeros de generación: María Celeste Benítez, José Cruz Contreras Aviña, Feliciano Javier Heredia Pineda, José Guadalupe Martínez Ávalos, Miguel Angel Pérez y Salvador Valenzuela, por compartir conmigo experiencias buenas y malas en una fase más como profesionistas.

Doy gracias también a todos aquellos estudiantes que de alguna manera u otra, formaron parte de mi entono, el cual formó un medio hostil y óptimo para poder realizar y cumplir con mis propósitos.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue caracterizar la composición química y la deposición de nutrientes minerales a través de la precipitación incidente y la precipitación efectiva que pasa a través del dosel de *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebano* y *P. pallens*, entre el 15 de Marzo de 1996 y 15 de Marzo de 1997. Durante el periodo experimental, se determinaron las concentraciones (mg/L) de macro (Ca, K, Mg y Na) y microelementos (Fe, Mn, Cu y Zn), así como el pH y la conductividad específica (CE) en cada evento de precipitación. Así mismo, análisis foliares y de suelo fueron realizados para relacionar y sustentar los resultados en cuanto a disponibilidad de nutrientes, absorción y translocación. Paralelamente al estudio, se realizaron observaciones fenológicas de las especies. Los datos fueron analizados por evento de precipitación, por estación y sobre una deposición media anual de nutrientes utilizando un diseño completamente aleatorio. Así mismo, aspectos hidrológicos tales como intercepción de lluvia por el dosel de las especies estudiadas fueron determinados.

La concentración de todos los nutrientes minerales evaluados, pH y CE fueron más altos en la precipitación efectiva de las especies que en la precipitación incidente. Las concentraciones de Ca, Na, Mn, Cu y Zn fueron más altos en la estación de primavera, mientras que los valores más altos de Fe y Mg fueron observados en otoño. No obstante, las concentraciones de K no mostraron diferencias significativas entre las estaciones. Los valores más altos de la deposición media anual de Ca, Mg y K fueron observados en la especie *P. ebano*, mientras que para Cu y Mn fueron observados en *A. berlandieri*. No se detectaron diferencias estadísticas en la deposición media anual de Na, Fe y Zn en precipitación incidente y efectiva. Por otro lado, a pesar de la ausencia de estructuras foliares y reproductivas en las estaciones de primavera y verano, la precipitación efectiva de todas las especies fue altamente enriquecida por todos los nutrientes minerales analizados.

De la precipitación total registrada, la precipitación efectiva representó el 81.3, 92.2, 84.6 y 94.4% para *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebano* y *P. pallens*, respectivamente, mientras que la intercepción de agua de lluvia fue del orden de 18.6, 7.77, 13.8 y 5.9% para *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebano* y *P. pallens*, respectivamente.

Los resultados indican que la deposición de nutrientes vía precipitación incidente está influenciada principalmente por los siguientes dos factores: 1) periodo entre eventos de precipitación y 2) cantidad de precipitación. Por otro lado, la deposición de nutrientes vía precipitación efectiva se relaciona a los dos factores antes mencionados así como también a el lixiviado de nutrientes de las propias hojas y al lavado de material y partículas que están depositadas en el dosel de las especies. Aunque un gran número de eventos con diferencias estadísticas en la deposición de nutrientes vía precipitación incidente y efectiva fueron observados durante el verano, los resultados encontrados sugieren que esto podría ser debido a las altas temperaturas que se presentan en esta estación, las cuales pueden jugar un papel importante en la lixiviación de nutrientes.

SUMMARY

The objective of this study was to characterize the chemistry composition and plant nutrient deposition by means of incident precipitation and throughfall under *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebano* and *P. pallens* between March 15, 1996 and March 15, 1997. During the experimental period, concentrations (mg/L) of macro (Ca, K, Mg and Na) and microelements (Fe, Mn, Cu and Zn), as well as, pH and specific conductivity (SC) were determined for each storm event. In addition, soil and foliar analysis were made in order to provide information regarding to nutrient availability, absorption and translocation mechanisms. Developmental aspects of each plant species were also observed throughout the study. Data collected of nutrient deposition in each storm event, seasons, and on an annual mean basis were subjected to a completely random design. In addition, hydrological aspects such as rainfall interception of each plant species were also monitored.

Concentration of all nutrients studied, pH and SC values were higher in throughfall with respect to incident precipitation. Concentrations of Ca, Na, Mn, Cu and Zn were higher during the spring season, whereas Fe and Mg were higher in autumn. However, concentrations of K were not significantly different between seasons. Annual mean deposition of Ca, Mg and K were higher in *P. ebano* whereas the highest values of Cu and Mn were observed in *A. berlandieri*. There were not statistical differences in Na, Fe and Zn depositions by means of incident precipitation and throughfall. In spite of the absence of foliar and reproductive structures during the spring and summer seasons, throughfall chemistry of all species was enriched by all nutrients analyzed.

Of the gross annual rainfall, throughfall comprised 81.3, 92.2, 84.6 and 94.4% for *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebano* and *P. pallens*, respectively, while the percentage of interception losses was 18.6, 7.77, 13.8 and 5.9% for *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebano* and *P. pallens*, respectively.

These results suggest that incident precipitation chemistry is influenced basically for two factors: 1) dry period between precipitation events and 2) amount of precipitation, whereas throughfall chemistry is related besides the two factors above mentioned, to the leaching of such nutrients from the leaves and to the washout of particles or materials deposited in the canopy of these species. Although a great number of storms with significant differences in nutrient deposition were observed in throughfall during summer, it is propose that it could be due to high temperatures that are present in this season, which may play an important role in nutrient leaching.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
ÍNDICE DE CUADROS	VI
INDICE DE FIGURAS	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 General.....	3
1.1.2 Específicos	3
1.2 Hipótesis	3
2. LITERATURA REVISADA.....	4
2.1 El ciclo de agua	4
2.1.1 Formación de la precipitación	4
2.1.2 Precipitación	5
2.2 Agua.....	5
2.2.1 Propiedades físicas	5
2.2.2 Propiedades químicas.....	6
2.2.3 Unidades de medición basadas en las propiedades del agua.....	7
2.3 La atmósfera como fuente de nutrientes.....	8
2.4 Generalidades sobre la nutrición mineral	9
2.4.1 Definición y clasificación.....	9
2.4.2 Función de nutrientes en las plantas	9
2.5 Factores que influyen la química de la precipitación	15
2.5.1 Cantidad de precipitación.....	15
2.5.2 Altitud	15
2.5.3 Actividad antropogénica	16
2.5.4 Tipo y edad de la vegetación	16

2.6 Estudios afines.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1 Ambiente físico	22
3.1.1 Localización y Descripción del Área de Estudio	22
3.1.2 Vegetación.....	22
3.1.3 Clima.....	22
3.1.4 Suelo.....	23
3.2 Material vegetal	26
3.2.1 Descripción de las especies estudiadas	26
3.2.2 Fenología vegetal	28
3.3 Descripción del experimento	28
3.3.1 Precipitación incidente.....	28
3.3.2 Precipitación efectiva.....	28
3.3.3 Colecta y preservación de las muestras de agua de lluvia	29
3.3.4 Muestreo de tejido foliar	30
3.3.5 Análisis químicos.....	30
3.3.6 Diseño experimental y análisis estadístico	31
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	33
4.1 Precipitación incidente.....	33
4.2 Relación de precipitación incidente y precipitación efectiva	37
4.3 Relaciones de intercepción	40
4.4 Concentración de nutrientes minerales en tejido foliar.....	44
4.5 Deposición media anual.....	49
4.6 Alteración cuantitativa y química de la precipitación por evento de lluvia.....	53
4.6.1 Precipitación	53
4.6.2 Concentración de Ca.....	55
4.6.3 Concentración de K.....	57
4.6.4 Concentración de Mg	59
4.6.5 Concentración de Na.....	62
4.6.6 Concentración de Fe	64

4.6.7 Concentración de Mn	66
4.6.8 Concentración de Cu.....	68
4.6.9 Concentración de Zn.....	69
4.6.10 Comportamiento del pH.....	72
4.6.11 Conductividad específica	75
4.7 Flujos estacionales de nutrientes.....	77
4.8 Flujos de nutrientes por especie	80
5. CONCLUSIONES.....	89
6. LITERATURA CITADA.....	91
APÉNDICE	100

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1	Concentración de elementos minerales en el suelo, determinados en dos fechas y en dos profundidades durante el periodo experimental. 25
2	Nombre científico, nombre común y familia de las especies estudiadas. 26
3	Parámetros optimizados del espectrofotómetro que se utilizaron para determinar la concentración de los elementos. 31
4	Coeficientes de cuadrados mínimos que estiman la precipitación efectiva en cada especie estudiadas como una función de la precipitación incidente (n=52). 39
5	Características hidrológicas de las especies estudiadas en relación precipitación efectiva e intercepción. 42
6	Coeficientes de cuadrados mínimos que estiman la intercepción en cada especie estudiada como una función de la precipitación incidente (n=52). 42
7	Comparación de medias entre la deposición media anual de nutrientes vía precipitación incidente y precipitación efectiva 51
8	Deposición nutricional acumulada (kg/Ha) en precipitación incidente y efectiva de 52 eventos de lluvia registrados durante el periodo experimental. 52
9	Comparación de medias entre la cantidad de precipitación incidente y precipitación efectiva (mm) por evento de lluvia..... 54
10	Comparación de medias entre la deposición de Ca (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia. 56
11	Comparación de medias entre la deposición de K (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia. 58
12	Comparación de medias entre la deposición de Mg (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia. 60
13	Comparación de medias entre la deposición de Na (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia. 62

14	Comparación de medias entre la deposición de Fe (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia.	64
15	Comparación de medias entre la deposición de Mn (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia.	66
16	Comparación de medias entre la deposición de Cu (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia.	68
17	Comparación de medias entre la deposición de Zn (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia.	70
18	Comparación de medias de los valores de pH vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia.....	73
19	Comparación de medias del comportamiento de la CE ($\mu\text{mhos/cm}$) vía precipitación incidente y precipitación efectiva por evento de lluvia.....	76
20	Comparación de medias de la deposición estacional de nutrientes minerales vía precipitación incidente y precipitación efectiva de cuatro especies leguminosas.	79
21	Comparación de medias de la deposición de macronutrientes vía precipitación incidente (testigo) y precipitación efectiva de cuatro especies leguminosas.	81
22	Comparación de medias de la deposición de micronutrientes (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva de las cuatro especies estudiadas.	82
23	Comparación de medias de la deposición de Ca (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva en cuatro especies leguminosas y en cuatro estaciones.....	84
24	Comparación de medias de la deposición de Mg (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva en cuatro especies leguminosas y en cuatro estaciones.....	85
25	Comparación de medias de la deposición de Fe (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva en cuatro especies leguminosas y en cuatro estaciones.....	86
26	Comparación de medias de la deposición de Mn (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva en cuatro especies leguminosas y en cuatro estaciones.....	87
27	Comparación de medias de la deposición de Cu (mg/L) vía precipitación incidente y precipitación efectiva en cuatro especies leguminosas en cuatro estaciones.	88

A 1	Fechas de los eventos de precipitación.....	101
A 2	Estadísticas básicas que describen el comportamiento de deposición media anual de 43 eventos de lluvia.....	102
A 3	Resumen del análisis de varianza que describe la deposición media anual de nutrientes vía precipitación incidente (testigo) y precipitación efectiva de las cuatro especies.....	102
A 4	Estadísticas básicas que describen la composición química del agua de lluvia en precipitación incidente y precipitación efectiva.....	103
A 5	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la cantidad de precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	108
A 6	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Ca en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	109
A 7	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de K en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	110
A 8	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Mg en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	111
A 9	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Na en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	112
A 10	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Fe en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	113
A 11	Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Mn en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	114

A 12 Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Cu en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.	115
A 13 Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias en la concentración de Zn en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.	116
A 14 Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias de pH en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.	117
A 15 Resumen del análisis de varianza de acuerdo al diseño completamente al azar para describir diferencias de CE en precipitación incidente y precipitación efectiva por evento.....	118
A 16 Análisis de varianza para describir la deposición de nutrientes minerales en las diferentes estaciones, vía precipitación y precipitación efectiva en las cuatro especies estudiadas.....	119
A 17 Análisis de varianza para describir la deposición de nutrientes minerales que mostraron interacción significativa.	120

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Precipitación y temperaturas (máximas y mínimas) diarias registradas de Marzo 1996 a Marzo 1997.....	23
2 Precipitación incidente registrada de los 52 eventos de lluvia.....	34
3 Histograma de frecuencias de precipitación incidente.....	35
4 Frecuencia relativa mensual de precipitación incidente.....	36
5 Distribución mensual de la precipitación incidente durante el periodo experimental.	36
6 Relación entre precipitación incidente y precipitación efectiva en las cuatro especies estudiadas.	38
7 Ajuste de los modelos precipitación efectiva de las cuatro especies.	39
8 Relación entre precipitación incidente e interceptación en las cuatro especies estudiadas.	41
9 Ajuste de los modelos de interceptación de las cuatro especies.....	43
10 Concentración foliar de Ca en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	44
11 Concentración foliar de K en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	45
12 Concentración foliar de Mg en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	46
13 Concentración foliar de Fe en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	46
14 Concentración foliar de Mn en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	47
15 Concentración foliar de Cu en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	48

16	Concentración foliar de Zn en cuatro especies leguminosas muestreadas en seis fechas durante el periodo experimental.	48
----	--	----

1. INTRODUCCIÓN

El agua representa el flujo más grande de cualquier sustancia en un ecosistema (Waring y Schlesinger, 1985), no obstante, para algunos lugares, principalmente en regiones desérticas y semidesérticas, este recurso constituye uno de los factores limitantes más importantes, ya que determina el desarrollo y patrones de distribución de las comunidades vegetales (Pigott y Pigott, 1993).

El papel que desempeña la precipitación pluvial en su entrada a los ecosistemas ha sido estudiada desde hace varias décadas (Manokaran, 1979); así mismo, diversos estudios se han llevado a cabo para cuantificar el balance de agua con la cubierta vegetal, pero muy pocas investigaciones se han hecho sobre bases comparativas para obtener información relevante del problema, uso y conocimiento más detallado de este recurso (Reynolds y Leyton, 1963).

La precipitación pluvial se considera una de las formas más importantes de entrada de nutrientes a los ecosistemas terrestres, particularmente para aquellos elementos que no se encuentran disponibles in situ. Por ejemplo, en ecosistemas con poco nitrógeno biológico, la precipitación permite una entrada muy significativa de este elemento al sistema (Fahey et al., 1988) y particularmente donde los procesos de intemperización son lentos (Newman, 1995). Así mismo, la precipitación puede ser una forma de entrada de otros minerales y aerosoles contenidos en la misma (Raison et al., 1985). Por otro lado, la reincorporación de los bioelementos al suelo es principalmente mediante la precipitación que pasa a través del dosel vegetal (Santa Regina et al., 1989).

La lluvia incidente en el dosel de un bosque es categorizada dentro de tres formas; 1) una pequeña parte se pierde mediante evaporación una vez que ha sido interceptada por tallos, hojas y ramas (Leonard, 1961), 2) otra porción de la lluvia que es interceptada por las estructuras vegetales, como ramas y tallos y que es conducida a través de ellos hacia el suelo depositándose en la base del árbol, se le ha llamado *escurrimiento fustal* (Gesper y Holowaychuk, 1970; Pressland, 1973; Manokaran, 1979; James et al., 1984; Sood et al., 1993) y 3) una vez que la precipitación ha saturado el dosel, fluye hasta depositarse en el piso forestal, a esta porción de precipitación se le conoce como precipitación efectiva (Helvey y Patric, 1965; Lawson 1967; Gesper y Holowaychuk, 1970; Branson et al., 1972; Parker, 1983).

Aunque la precipitación efectiva se define como la suma del escurrimiento fustal más la precipitación que pasa a través de las coronas de los árboles (Reynolds y Leyton, 1963; Rothacher, 1963; Manokaran, 1979) estas son estudiadas individualmente. En la presente investigación es estudiada solamente la que pasa por el dosel vegetal (efectiva), sin considerar el escurrimiento fustal, ya que estudios de intercepción en especies afines demuestran que ésta última representa una pequeña parte de la precipitación (Návar, 1993).

En este sentido la precipitación pluvial y el dosel vegetal cumplen una función muy importante ya que al pasar la lluvia a través de el, esta es redistribuida antes de llegar al suelo y mucho más interesante resulta todavía, es su alteración química de manera significativa (Parker, 1983; Gauquelin et al., 1992). La alteración de la composición del agua de lluvia con el contacto de los tejidos de las plantas ha sido reconocida desde N. Theodore de Saussure en 1804 (Tukey, 1970).

Estudios sobre la composición química de la lluvia en precipitación que pasa a través del dosel (efectiva), actualmente están aumentando en interés y número de manera considerable en diversos lugares, principalmente para conocer la dinámica del flujo e incorporación de nutrientes por este medio, así mismo, dichos estudios han sido realizados en una gran variedad de localizaciones geográficas y la mayoría de estas investigaciones han sido desarrolladas en los últimos diez años (Parker, 1983).

En base a lo anteriormente mencionado, ya que la precipitación pluvial y las especies vegetales desempeñan una función importante en el ciclo de nutrientes, nuestra investigación se enfoca a estudiar la química de la precipitación pluvial en una región del noroeste de Mexico para conocer el flujo o entrada de nutrientes a un ecosistema y como las especies vegetales incorporan nutrimentos a suelo mineral mediante la precipitación que pasa a través del dosel vegetal.

Por otro lado en nuestro país, existen escasos estudios al respecto, por lo que resulta interesante llevar a cabo este tipo de investigaciones en especies vegetales endémicas, ya que dichas especies son de gran importancia ecológica, económica y forestal, particularmente en ésta región. De este modo, se podrá conocer mejor la dinámica y flujo de nutrientes en la precipitación pluvial y en cada una de las especies estudiadas, con ello, se pretende proporcionar una herramienta más para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales. Con lo anteriormente mencionado, los siguientes objetivos fueron propuestos.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Caracterizar la composición química y deposición de nutrientes minerales vía precipitación incidente y efectiva en especies arbustivas endémicas del noreste de Mexico.

1.1.2 Específicos

a) Evaluar el flujo de nutrientes vía precipitación incidente y precipitación efectiva en *Acacia rigidula*, *A. berlandieri*, *Pithecellobium ebanum* y *P. pallens*.

b) Hipotetizar posibles mecanismos por medio de los cuales el dosel vegetal altera la composición química de la lluvia al pasar a través de sus componentes.

c) Identificar que especies tienen mayor capacidad de permitir un flujo de nutrientes en términos de disponibilidad, absorción y traslocación.

1.2 Hipótesis

Existen diferencias en la aportación de nutrientes minerales vía precipitación incidente y precipitación efectiva, en los diferentes eventos de precipitación pluvial, entre estaciones del año, y entre especies.

2. LITERATURA REVISADA

2.1 El ciclo de agua

De acuerdo a Branson et al., (1972) el movimiento del agua sobre la tierra (el ciclo hidrológico) es muy complejo el cual envuelve varios procesos, sin embargo es conveniente separarlo en categorías de acuerdo al movimiento del agua, las principales fases que incluye son: evaporación, precipitación y escurrimiento.

1. Evaporación es la formación de vapor de agua. Una gran cantidad de vapor de agua es producido por evaporación del agua de los océanos, ríos, lagos, etc. El agua puede evaporarse también de los tejidos de las plantas, especialmente de las superficies foliares a través de procesos de transpiración.

2. Precipitación significa caída de una altura. Refiriendonos al agua, precipitación incluye todas las formas en el cual la humedad atmosférica desciende a la tierra en forma de lluvia, nieve, escarcha y granizo. El agua que entra a la atmósfera por evaporación debe primero condensarse y cambiar su estado gaseoso a líquido (nubes y lluvia) o a estado sólido (nieve, granizo y escarcha) antes de que pueda caer.

3. Escurrimiento es el flujo de regreso a los océanos de la precipitación que cae sobre la tierra. En esta forma la tierra regresa el agua que fue evaporada de los océanos. El escurrimiento ocurre de dos formas, superficial y subterráneo.

El ciclo hidrológico ha sido el tema de muchas investigaciones, principalmente por su importancia en los ecosistemas de zonas áridas y es probablemente el mejor de los ciclos abióticos conocidos (Johon, 1983).

2.1.1 Formación de la precipitación

El aire contiene cantidades variables de vapor de agua cuyos valores dependen de la temperatura, cuanto mayor sea ésta, mayor es la cantidad que puede contener y al llegar a éste máximo puede comenzar la condensación en forma de pequeñísimas gotas de agua o cristales de hielo que en conjunto constituyen las nubes y nieblas. Sin embargo, no basta con que el aire se sature de agua, pues hace falta cierto grado de sobresaturación; es decir, más allá del punto máximo de saturación, por otro lado, deben existir núcleos de condensación los

cuales generalmente son pequeñísimas partículas (sal marina, polvo atmosférico, productos de combustión de erupciones volcánicas, etc.) sólidas en suspensión, en las que pueda depositarse el agua condensada. La mayoría de las gotas de agua en estado no precipitable tienen diámetros menores de 10 μm y una corriente de aire hacia arriba es suficiente para evitar que éstas se precipiten, por ésta razón, para que ocurra precipitación, los elementos de la nube deben aumentar en tamaño hasta que su velocidad de caída exceda la tasa de ascenso del aire (Ayllón y Gutierrez, 1983; Turk y Turk, 1984).

2.1.2 Precipitación

Desde hace mucho tiempo los hidrólogos han reportado que únicamente el 25% de la precipitación total que cae en áreas continentales regresa al mar como escorrentía directa o flujo de agua subterránea. Hoy en día se sabe que la evaporación desde la superficie de los océanos es la principal fuente de humedad para la precipitación y que no más del 10% de la precipitación continental se puede atribuir a la evaporación de los continentes, sin embargo, la cercanía a los océanos no conlleva a una precipitación adecuada, como lo ponen en evidencia muchas islas desérticas (Linsley et al., 1988).

La cantidad de vapor de agua en la atmósfera es muy grande, de hecho, se ha estimado que la cantidad de vapor de agua que se transporta sobre la tierra por los vientos es seis veces más que la cantidad de agua que fluye por todos los ríos (Branson et al., 1972).

2.2 Agua

Debido a su estabilidad química desde que Aristóteles (384-322 a. c.) dijo que existían cuatro “elementos”: tierra, aire, fuego y agua, este último fue considerado como un elemento y no como compuesto. Investigaciones posteriores observaron que el agua se formaba cuando el “aire inflamable” (hidrógeno), se quemaba en el aire, de esta manera se reconoció que efectivamente el agua era un compuesto (Toporek, 1984).

2.2.1 Propiedades físicas

Tebutt (1994) Describe las propiedades del agua, mencionando entre las propiedades físicas las siguientes:

1. Temperatura: Importante por su efecto en otras propiedades, por ejemplo, aceleración de reacciones químicas, reducción de solubilidad de los gases, intensificación de sabores.

2. Sabor y olor: Debido a impurezas disueltas frecuentemente de naturaleza orgánica, como fenoles y clorofenoles.

3. Color: Aún el agua pura no es incolora, es necesario diferenciar entre el color verdadero debido al material en solución y el color aparente debido a la materia suspendida.

Turk y Turk (1984), con respecto a las propiedades físicas mencionan lo siguiente: El agua existe en estado sólido (hielo), líquido (agua) y gaseoso (vapor de agua). En estado líquido, el agua es inodora, incolora e insípida. Alcanza su densidad máxima (peso por unidad de volumen) a 4°C. Por consiguiente, cuando el agua se congela a 0°C, el hielo que se forma es menos denso que el agua que lo rodea y por lo tanto flota en la superficie. En el otro extremo de la escala, el agua hierve y forma vapor (gas) si se eleva a suficiente temperatura. A nivel del mar, o a una presión atmosférica de 760 mm Hg, el agua hierve a los 100°C. Los líquidos alcanzan su punto de ebullición cuando la presión de vapor es igual a la presión atmosférica

2.2.2 Propiedades químicas

De la misma manera, Tebutt (1994) menciona entre otras, las siguientes propiedades químicas.

1. pH: Mide la intensidad de la acidez o alcalinidad de una muestra, aunque en realidad mide la concentración de iones H presentes. El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala bastante estrecha de pH, entre 6 y 8.

2. Alcalinidad: Es debido a la presencia de bicarbonatos, carbonatos o hidróxidos. La mayoría de la alcalinidad natural de las aguas la causa el bicarbonato. La alcalinidad es útil en el agua natural y en las aguas residuales porque proporciona un amortiguamiento para resistir los cambios de pH.

3. Oxígeno disuelto: Su presencia es esencial para mantener las formas de vida superiores y el efecto de descarga de desecho en un río, se determina principalmente por el balance de oxígeno del sistema.

4. Nitrógeno.- Es un elemento importante ya que las reacciones biológicas solo pueden efectuarse en presencia de suficiente nitrógeno. Se presenta en cuatro formas principales: orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos.

Por otro lado, Turk y Turk (1984), mencionan entre las propiedades químicas las siguientes.

1. El agua es un compuesto estable que puede calentarse a temperaturas elevadas sin descomponerse. Cuando se calienta a 2000°C tan sólo se descomponen el 1.5% y a 2700°C se descomponen el 11%.

2. El agua reacciona con algunos metales, o con sus óxidos, produciendo hidróxidos metálicos denominados bases.

3. El agua también reacciona con algunos óxidos y no metales produciendo sustancias que se denominan ácidos.

4. Otra propiedad química del agua, de gran importancia para el funcionamiento de los organismos vivos, es el proceso denominado hidrólisis (*hidro*, agua y *lisis*, descomposición bajo influencia del agua).

2.2.3 Unidades de medición basadas en las propiedades del agua

Toporek, (1984), detalla algunos principios basados en las propiedades del agua, tales como:

1. La escala centígrada de temperatura, establecida en 1742 por el sueco Anders Celsius, está dividida en 100 grados desde el punto de fusión del agua, 0°C, hasta el punto de ebullición, 100°C, a presión estándar de 760 mm de Hg. Por consiguiente, un grado centígrado o Celsius se define como un centésimo de la diferencia de temperaturas entre los puntos de fusión y ebullición del agua pura.

2. Empleando la escala Celsius, la unidad de calor, caloría, se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua un grado, de 15°C a 16°C.

3. Otra unidad de medición que se emplea con frecuencia y se basa en las propiedades físicas del agua es la densidad. Se calcula comparando el peso de 1 ml de determinada sustancia, con el peso de 1 ml de agua a 4°C, que es 1.000 gramos.

El agua no solo constituye la materia prima de la fotosíntesis, sino que también participa como reactivo en sus transformaciones, lo mismo que en otras numerosas reacciones del metabolismo. El agua sirve también como disolvente indispensable para la mayoría de los compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos que participan en el metabolismo. En plantas superiores, el agua tiene fuera de la célula la función de un medio de transporte, mediante el cual, especialmente las sales nutritivas llegan desde las raíces a los órganos epigeos. Por lo tanto, se comprende que un suministro inadecuado de agua no sola afecta o bloquea a la fotosíntesis, sino también a otros procesos vitales (Richter, 1971).

2.3 La atmósfera como fuente de nutrientes

La atmósfera es una fuente de nutrientes para las plantas. El agua de lluvia y la nieve contienen partículas disueltas, incluyendo altas cantidades de nitrógeno el cual promueve el crecimiento de la vegetación. Las hojas y superficies de las ramas actúan como eficientes filtros de partículas atmosféricas y gases que contienen nutrientes. La mayor parte del Nitrógeno, Azufre y Cloro en los ecosistemas forestales es derivado de la atmósfera. La atmósfera contiene gases traza, particularmente formas oxidadas de N y S, las cuales son fuentes para las plantas, estos gases son derivados de una gran variedad de fuentes naturales y humanas. En años recientes, la actividad antropogénica ha incorporado a la atmósfera (a través de procesos industriales) grandes cantidades de gases incluyendo NO_2 y SO_2 (Asbury et al., 1994).

Los constituyentes químicos del agua de lluvia son derivados también de los océanos, aproximadamente del 3 al 4% de la superficie de los océanos está cubierta de burbujas, estas burbujas se descomponen en pequenísimas gotas de agua, las cuales son elevadas por los vientos existentes, las gotas se evaporan y dejan atrás pequeñas partículas y aerosoles, las cuales contienen importantes constituyentes químicos de agua de mar, especialmente Sodio, Magnesio, Cloro y Sulfatos. De esta manera, cada año 10 billones de toneladas de sal de mar es incorporada a la atmósfera (Waring y Schesinger, 1985; Brown y Lles 1991). Los aerosoles son producidos en una gran variedad de tamaños, generalmente estos son menores de $1 \mu\text{m}$ los cuales pueden permanecer en la atmósfera por días y ser transportados a grandes distancias. Además, las erupciones volcánicas e incendios pueden inyectar grandes cantidades de partículas y gases a la atmósfera, los cuales son transportados a grandes distancias (Veneklaas, 1990; Neal et al., 1994).

Polvo derivado de tormentas de viento en regiones áridas y semiáridas también producen aerosoles atmosféricos que son particularmente ricos en Calcio, Potasio y Sulfato (Novo et al., 1992).

2.4 Generalidades sobre la nutrición mineral

2.4.1 Definición y clasificación

Una característica excepcional de la vida, es la capacidad de las células vivas de tomar sustancias del medio ambiente y usarlas para la síntesis de sus propios componentes celulares o como fuente de energía. El suministro y absorción de componentes químicos necesarios para el crecimiento y metabolismo puede ser definido como nutrición y los componentes químicos requeridos por un organismo son llamados nutrientes (Mengel y Kirkby, 1982).

Arnon y Stout (1939) citado por Mengel y Kirkby, (1982), mencionan que para que un elemento sea considerado esencial debe cumplir con los siguientes requisitos: a) La planta no completa su ciclo de vida en ausencia del elemento mineral, b) La función del elemento no debe ser reemplazable por otro elemento mineral y c) El elemento debe implicarse directamente en el metabolismo de las plantas.

Los nutrientes en plantas pueden ser clasificados como macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes se encuentran y son necesarios para las plantas en relativamente más altas cantidades que los micronutrientes. El contenido de el macronutriente en el tejido de la planta es generalmente miles de veces más grande que un micronutriente. Usando esta clasificación basada sobre el contenido del elemento en el material de la planta, los siguientes elementos pueden ser definidos como macronutrientes: C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg (Na, Si). Los micronutrientes son: Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Cl (Arnon y Stout, 1939, citado por Mengel y Kirkby, 1982).

2.4.2 Función de nutrientes en las plantas

2.4.2.1 Calcio (Ca)

El promedio de contenido de Ca en la corteza terrestre es alrededor de 3.64%. El contenido de Ca difiere en los tipos de suelos y varía principalmente del material parental y el grado de intemperización. Las plantas superiores contienen apreciables cantidades de Ca y en

el orden de 5 a 30 mg Ca/g de materia seca. Estas altas concentraciones de Ca, sin embargo, resultan principalmente del alto nivel de Ca en el suelo, más que de la eficiencia del mecanismo de absorción de Ca por las células de la raíz. Generalmente, el Ca en el suelo es aproximadamente 10 veces más alto que el de K. La absorción de Ca, sin embargo, es usualmente menor que de la de K, esta baja absorción es porque el Ca es absorbido solamente por raíces jóvenes (Mengel y Kirkby, 1982).

La necesidad del Ca para el crecimiento de las plantas puede ser fácilmente demostrado, pues la interrupción del abastecimiento de Ca a las raíces, reduce su tasa de crecimiento y después de algunos días los ápices de las raíces llegan a la necrosis y posteriormente la planta muere (Devlin, 1982). Existe evidencia de que el Ca es de fundamental importancia para la permeabilidad de la membrana y para mantener la integridad de las células. La senescencia por ejemplo, es la peculiar característica de la deficiencia de Ca. El Ca es requerido para la elongación de células y división celular (Burstrom, 1968 citado por Salisbury y Ross, 1994).

2.4.2.2 Potasio (K)

El promedio del contenido de K en la corteza terrestre es del orden de 2.3%. La principal fuente de K para el crecimiento de las plantas bajo condiciones naturales proviene de la intemperización de K. El comportamiento de K en el suelo es muy dependiente del contenido de arcillas y tipos de minerales arcillosos presentes. El K es un elemento esencial para todos los organismos vivos. En fisiología vegetal, es el más importante catión, no sólo con respecto al contenido en el tejido vegetal, sino también con respecto a las funciones fisiológicas y bioquímicas. El mecanismo de apertura y cierre de estomas depende enteramente de el flujo de K, por esta razón, las plantas con inadecuado abastecimiento de K tienen deficiencia en esta actividad, Penny and Bowling (1974) citado por Mengel y Kirkby (1982).

Una de las principales características de K es la alta tasa en la cual es absorbido por el tejido de las plantas. El K en las plantas es muy móvil. El K que se encuentra en los tejidos maduros y es transportado hacia los tejidos jóvenes. Es indispensable para obtener óptimo turgor de las células. El turgor en los tejidos jóvenes parece ser el mejor parámetro indicador del estatus nutricional de K (Salisbury y Ross, 1994).

2.4.2.3 Magnesio (Mg)

El Mg casi nunca es un factor limitante en el suelo para el crecimiento vegetal. Además de su presencia en la clorofila, el Mg es esencial ya que favorece la hidrólisis del ATP

(permitiendo así que participe en muchas reacciones) y porque activa muchas enzimas necesarias en la fotosíntesis, respiración y formación de DNA y RNA (Salisbury y Ross, 1994).

La distribución del Mg en suelos puede ser considerado en la misma forma que la distribución de K y dividido dentro de intercambiable y no intercambiable y soluble en agua. Un papel importante del Mg es actuar como cofactor de todos los procesos de fosforilación. Generalmente cuando las plantas tienen deficiencia de Mg, la proporción de proteína decrementa, de esta forma se puede concluir que la deficiencia de Mg inhibe la síntesis de proteínas. La deficiencia de Mg difiere entre especies de plantas aunque algunas características generales son aparentes. La deficiencia de Mg puede ser el resultado de un gran suplemento de K. El Mg como se mencionó es móvil en las plantas y la deficiencia siempre comienza en las hojas más maduras moviéndose hacia las jóvenes. Por lo tanto, las hojas deficientes de Mg caen prematuramente (Mengel y Kirkby, 1982).

Una alta proporción de Mg está involucrado en la regulación del pH celular y el balance de catión-anión. El Mg en las plantas está relacionado a su movilidad dentro de las células y su capacidad para interactuar fuertemente con ligandos nucleofílicos (grupos fosforil). Una mayor función de Mg y ciertamente es la función más familiar, es su papel como átomo central de la molécula de clorofila (Marschner, 1986).

2.4.2.4 Sodio (Na)

El contenido de Na en la corteza terrestre es alrededor de 2.8%. En regiones templadas la concentración de Na en la solución del suelo promedia 0.1-1 mM. En regiones áridas y semiáridas, particularmente bajo condiciones de irrigación, concentraciones de 50 a 100 mM son típicas y tienen un efecto bastante perjudicial sobre el crecimiento de muchos cultivos (Mengel y Kirkby, 1982).

El papel del Na en nutrición mineral ha sido considerado desde dos puntos de vista: su esencialidad y/o la manera en la cual puede reemplazar funciones de K en plantas. El primero, su esencialidad ha sido establecido para las Halófitas *Atriplex vesicaria*. Experimentos demostraron que plantas cultivadas bajo pequeñas concentraciones de Na sufrieron clorosis y necrosis aún en altos niveles de K. El segundo, los efectos benéficos de Na sobre el crecimiento en plantas no-halófitas es bien conocido en agricultura y horticultura (Marschner, 1986).

Algunos de los efectos benéficos del Na son la expansión de células y balance de agua en algunas especies, principalmente en plantas suculentas. La aplicación de fertilizantes a base de Na resulta en un incremento del índice de área foliar en estaciones de crecimientos tempranas, con ello se obtiene un incremento en la intercepción de luz y mejora la eficiencia del uso de agua bajo condiciones moderadas de estrés durante las épocas de crecimiento (Durrant et al., 1978 citado por Marschner, 1986).

Es poco probable que la falta de Na llegue a ser un factor limitante del crecimiento vegetal en condiciones naturales. Sin embargo, como el Na tiene una función importante en la fotosíntesis de plantas C4, este continúa siendo un campo de estudio interesante (Peter F. Brownell, citado por Salisbury y Ross, 1994).

El Na, Si y Co han sido establecidos como elementos esenciales o benéficos para algunas plantas superiores. En el caso de Na, hay algunas especies de plantas pertenecientes a la familia *Chenopodiaceae* y especies adaptadas a condiciones salinas que absorben este elemento en relativamente altas cantidades (Mengel y Kirkby, 1982).

2.4.2.5 Hierro (Fe)

El Fe se presenta alrededor 5% del peso de la corteza terrestre y esta invariablemente presente en todos los suelos. Los minerales primarios en los cuales el Fe está presente incluyen silicatos ferromagnésicos tales como olivino, augita, hornblenda y biotita. Todos estos minerales con las micas de biotita constituyen la mayor fuente de Fe en rocas ígneas. El contenido de Fe soluble en los suelos es extremadamente bajo en comparación con el contenido de Fe total (Mengel y Kirkby, 1982).

Una característica importante del Fe en suelos y plantas es la forma orgánica compleja o quelatos en que se encuentra disponible. En suelos muy lavados y pobremente drenados esta propiedad resulta en la movilización del Fe de los horizontes superiores hacia los inferiores. El Fe no es fácilmente móvil dentro de los diferentes tejidos de las plantas. Plantas deficientes de Fe pronto llegan a ser cloróticas en las partes más jóvenes, siguiendo la marchitación hacia los tejidos remanentes más maduros. En plantas superiores frecuentemente hay una buena correlación entre el nivel de abastecimiento de Fe y el contenido de clorofila. Las plantas bien suministradas de Fe presentan altos contenidos de clorofila (Mengel y Kirkby, 1982).

El Fe puede ser absorbido por las raíces de las plantas como Fe^{2+} o como quelatos de Fe. La disponibilidad de Fe inorgánico a las raíces de las plantas por lo tanto parece ser

dependiente de la habilidad de las raíces a pH bajos y a reducir de Fe^{3+} a Fe^{2+} en la rizosfera. En contraste al Fe inorgánico, los quelatos de Fe son solubles y por lo tanto disponibles a las raíces, sin embargo la absorción de todos los quelatos de Fe es muy baja. La absorción de Fe está influenciado por otros cationes, de los más competitivos se pueden enunciar Mn^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Zn^{2+} (Marschner, 1986).

Las plantas deficientes en Fe se caracterizan por desarrollar una clorosis intervenal pronunciada, similar a la desarrollada por la deficiencia de Mg, pero se presenta primero en las hojas más jóvenes. En ocasiones muy severas, las hojas se tornan blancas con lesiones necróticas. La función más conocida del Fe es como cofactor de diversas enzimas. El Fe es esencial debido a que forma parte de ciertas enzimas y numerosas proteínas que transportan electrones durante la fotosíntesis y la respiración (Salisbury y Ross, 1994).

2.4.2.6 Manganese (Mn)

El Mn ocurre en varias rocas primarias y particularmente en materiales ferromagnesianos. El Mn es frecuentemente liberado de esas rocas por mecanismos de intemperización. Los niveles totales de Mn pueden diferir considerablemente entre suelos. Como el nivel de Mn en el suelo depende de las reacciones óxido-reducción, los factores que influyen este proceso tienen un impacto sobre la disponibilidad de Mn, estos factores incluyen el pH del suelo, contenido de materia orgánica, actividad microbial y humedad del suelo (Mengel y Kirkby 1982).

De acuerdo con Bremner and Knight, (1970) citado por Mengel y Kirkby, (1982), encontraron que el Mn es preferencialmente translocado hacia los tejidos meristemáticos, por lo tanto, órganos de plantas jóvenes son generalmente ricos en Mn,

Las deficiencias de Mn no son muy comunes, sin embargo, algunas enfermedades como “el moteado gris” de la avena es uno de ellos, “manchas de lodo” en el chícharo y el “moteado amarillo” en la remolacha azucarera, ésta se presenta, cuando no existen las cantidades adecuadas de este elemento. Cloroplastos aislados de hojas de espinaca demuestran que la ausencia de Mn provoca una desorganización de las membranas tilacoidales; esto indica que el elemento tiene una función estructural en el sistema de membranas del cloroplasto y además de su participación importante en la fotólisis del agua (Salisbury y Ross, 1994).

En dicotiledóneas, la clorosis es uno de los síntomas de deficiencia de este elemento, presentándose este en hojas jóvenes principalmente. Bajo condiciones de campo, la

deficiencia de Mn está usualmente confinada a plantas que crece en suelos tropicales deslavados y de pH alto con un gran contenido de materia orgánica. Esto puede ser fácilmente corregido con la aplicación de $MnSO_4$ al suelo o tejido foliar (Marschner, 1986).

2.4.2.7 Cobre (Cu)

El Cu ocurre en el suelo casi exclusivamente en forma divalente. Las fracciones mayores de Cu están usualmente presente en los látices de cristal y minerales secundarios. Además el Cu ocurre en componentes orgánicos y está presente como un catión intercambiable en los coloides del suelo y es un constituyente de la solución del suelo (Mengel y Kirkby, 1982).

Así mismo, el nivel de Cu en la solución del suelo decrementa cuando se incrementa el pH debido a una fuerte absorción del Cu. Su concentración en el suelo está gobernada por la adsorción a las partículas de suelo. Dado que el Cu está fuertemente ligado a las partículas de suelo, es muy inmóvil, y por lo tanto al agregar Cu como fertilizante estará restringido exclusivamente a las capas superiores del suelo. El Cu no es fácilmente movible en las plantas aunque este puede ser translocado de las hojas maduras a las más jóvenes. Resultados han demostrado que el movimiento del Cu es dependiente del estatus del mismo en la planta (Mengel y Kirkby, 1982; Marschner, 1986).

Relativamente altas concentraciones de Cu ocurren en los cloroplastos. A este respecto, el comportamiento del Cu es similar al Fe, ya que es un constituyente del cloroplasto. El Cu juega un papel importante también en la síntesis y estabilidad de la clorofila y de otros pigmentos de las plantas (Mengel y Kirkby, 1982).

Las plantas rara vez presentan deficiencia de Cu, en parte, porque lo requieren en cantidades muy pequeñas. En ausencia de Cu, las hojas adquieren un color verde oscuro y están arrugadas o deformes y muchas veces, presentan manchas necróticas. Ya que es requerido en pequeñas cantidades, en algunas ocasiones el Cu se vuelve tóxico. El Cu está presente en diversas enzimas o proteínas implicadas en los procesos de oxidación y reducción, por ejemplo, en la enzima citocromo oxidasa, una enzima involucrada en la cadena de transporte de electrones de la respiración que se encuentra en las mitocondrias y la plastocianina, una proteína de los cloroplastos (Salisbury y Ross, 1994).

2.4.2.8 Zinc (Zn)

El Zn puede ser absorbido a los coloides del suelo como Zn^{2+} , $ZnOH^+$ o $ZnCl^+$; la intensidad de absorción de Zn por geotitas se incrementa conforme aumenta el pH y por esta razón la movilidad del Zn está particularmente restringido en suelos neutrales y alcalinos. La solubilidad de Zn es especialmente bajo en suelos de pH alto y particularmente cuando el $CaCO_3$ esta presente. El Zn interactúa con la materia orgánica del suelo, formando complejos orgánicos de Zn solubles e insolubles. La movilidad del Zn en plantas no es muy grande. El Zn se acumula en los tejidos de las raíces especialmente cuando el abastecimiento de Zn es alto. En hojas maduras el Zn llega a ser muy inmóvil (Mengel y Kirkby, 1982).

Las anomalías causadas por la deficiencia de Zn incluyen hojas pequeñas y el escarapelado de frutas de manzanas y duraznos a consecuencia de la disminución en el crecimiento de las hojas jóvenes y de los entrenudos del tallo. Los márgenes de las hojas con frecuencia presentan distorsiones y pliegues. A menudo ocurre clorosis intervenal en hojas de maíz, sorgo, frijol y árboles frutales, lo que significa que el Zn participa en la formación de clorofila (Salisbury y Ross, 1994).

2.5 Factores que influyen la química de la precipitación

2.5.1 Cantidad de precipitación

La cantidad, duración, e intensidad de la precipitación así como época del año son algunos de los factores determinantes sobre la magnitud o cantidad de precipitación (Leonard, 1961; Manokaran, 1979), del material removido de la atmósfera y del dosel de los vegetales (Marschner, 1986; Schreiber et al., 1990). Conjuntamente a esto, la disponibilidad, inclinación y número de ramas, forma y tamaño de las hojas, rugosidad de la corteza (Satterlund, 1973; Herwitz, 1986; Návar et al., 1994). La precipitación pluvial y precipitación efectiva se correlacionaron positivamente ya que si se incrementa intensidad de la precipitación, se incrementa la precipitación efectiva (Pressland, 1973).

2.5.2 Altitud

Las influencias altitudinales tienen cierta inferencia en la deposición de nutrientes en precipitación efectiva a través de las diferentes épocas de crecimiento (Parker, 1983; Atteia et al., 1993) ya que existe variabilidad en las precipitaciones pluviales (O' Connor et al., 1995). Sin embargo, no es sorprendente que los flujos de nutrientes vía precipitación incidente y

efectiva sean más altos en bosques tropicales y subtropicales que en bosques boreales (Arthur y Fahey, 1993). Por otra parte, los vientos influyen en el transporte de masas de nube hacia regiones más altas (Padilla et al., 1996). En base a que la fertilidad de los sitios podría estar en función de la precipitación que ocurre en las diferentes regiones, la química de la lluvia podría también ser función de este gradiente (Leininger y Winner, 1988).

2.5.3 Actividad antropogénica

Las áreas expuestas a contaminantes atmosféricos y descargas de desechos industriales influyen grandemente la química de la precipitación incidente y precipitación efectiva (Glatzel, 1990; Buffoni y Tita, 1993;). Algunas áreas las cuales son sometidas al fuego pueden contener y agregar a la atmósfera descargas de algunos gases y partículas de ceniza que podrían contener algunos iones (Dambrine et al., 1993). Ecosistemas cercanos a industrias retienen nutrientes que pueden afectar el papel de la vegetación en los balances bioquímicos (Domingo et al., 1994). Artificialmente el hombre puede afectar la precipitación efectiva mediante la adición de fertilizantes. Khanna y Ulrich (1981), observaron un incremento en la concentración de los nutrientes en precipitación efectiva elaborando este tipo de investigaciones.

2.5.4 Tipo y edad de la vegetación

La pérdida de nutrientes por lixiviación de la vegetación joven es dada en menores cantidades que la que podría aportar un bosque de árboles maduros (Carleton y Kavanagh, 1990; Potter, 1991; Srivastava et al., 1994). Así mismo, el tamaño y tipo de la vegetación está en función de la concentración de los nutrientes que se pueden obtener bajo la vegetación (Andersson, 1991). Algunos estudios sobre la química en árboles muertos han revelado que el aporte de nutrientes al escurrir el agua de lluvia por los tallos, es mayor que en tallos de árboles vivos (Watters et al., 1988). Por otro lado, con la simulación de lluvias ácidas se ha observado un incremento en la lixiviación de nutrientes de hojas maduras pero en mayor grado en hojas jóvenes (Fritsche, 1992).

2.6 Estudios afines

Leininger y Winner (1988), analizaron la composición química de la precipitación efectiva en *Quercus rubra*. En su estudio encontraron que el agua de lluvia que pasa a través de las coronas de los árboles fue enriquecida con, SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , PO_4 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Mn^{2+} , y Fe^{2+}

pero perdieron NH_4^+ . Así mismo, se observó en tal estudio que las concentraciones aportadas de Na^+ e H^+ , fue mayor en suelos infértiles con respecto a suelos fértiles. Para el caso de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ y SO_4^{2-} , la concentración resultó ser más elevada en sitios fértiles que en aquellos infértiles. En dicho estudio se concluye que las diferencias químicas en la lluvia que pasa a través de las coronas de los árboles responden principalmente a la habilidad de las coronas para capturar partículas de suelo, deposición de estas partículas y ocurrencia y volumen del agua de lluvia.

Okeke y Omaliko (1991), enfocaron sus estudios hacia enriquecimiento del suelo por algunos nutrientes a través de la precipitación efectiva y caída de hojas de los árboles en rodales de *Acioa barteri* de siete años de edad en Ozala, Nigeria. Dichos autores encontraron que la precipitación efectiva tuvo las medias más altas para todos los nutrientes excepto para Mg, el cual fue muy similar en caída de hojas y precipitación efectiva. El K tuvo los valores más bajos en ambos casos, caída de hojas y en las muestras de agua. Para los valores bajos de K y negativos de Mg en precipitación efectiva ellos concluyen que podrían ser índices de deficiencias de K y Mg en los suelos de Ozala, Nigeria. Así mismo, mencionan que la entrada de nutrientes al suelo incluye no solo la precipitación efectiva y caída de hojas, sino que el agua que escurre por los fustes es también una entrada importante de nutrientes.

La influencia del agua que escurre por los tallos sobre algunos iones en rodales de *Populus tremuloides* Michx., *P. Grandidentata* Michx. y *Acer rubrum* L., en árboles muertos y vivos, mostraron que la química de árboles muertos es cuantitativamente diferente a la de los árboles vivos. Así mismo, los árboles muertos contribuyen en gran proporción, principalmente en nitratos y fosfatos, sobre las cantidades de los iones disponibles en el sistema. La media de la química que fluyó por los tallos de árboles muertos fue de 46 veces más en fosfato, 3 veces más de nitrato y aproximadamente 1.5 más de K comparado con árboles vivos, los cuales son dependientes de las especies (Watters y Price, 1988).

Las especies incrementan su aerodinámica y rugosidad (arquitectura del dosel) para eficientizar la captura de partículas de polvo, la cual son fuente de nutrientes para las mismas plantas (Draaijers et al., 1991; Rustad et al., 1994).

Raison et al., (1985), estudiaron la transferencia de algunos nutrientes a la atmósfera a partir de quemas prescritas de tres bosques subalpinos de *Eucalyptus* spp.. La transferencia de los elementos fue calculada como la diferencia entre la cantidad de un elemento en el

combustible antes de ser quemado y aquel presente después del fuego. El porcentaje de pérdida de los elementos se correlacionó linealmente con el porcentaje de pérdida de peso del combustible. El porcentaje de pérdida de nutrientes observado fue $N > K > P > Ca$. Esto indica una gran pérdida de nutrientes hacia la atmósfera pero constituye una fuente importante de posible entrada de nutrientes a otros ecosistemas, en la cual la lluvia actúa como vehículo de muchos de estos elementos que se encuentran en la atmósfera.

Por su lado, Mesanza (1994), Observó que las copas de los árboles de *Pinus radiata* tuvieron la capacidad de neutralizar la deposición ácida, esto es, lluvias con pH ácido, fue incrementado por el dosel de los árboles, observando también que el pH fue mayor en períodos de sequía.

Estudios para observar la variabilidad espacial y requerimientos de colectores para muestrear la precipitación efectiva fue hecha por Puckett (1991), encontrando que la concentración de algunos iones fue menos variable dentro de eventos lluvioso. Por ejemplo, Ca^{2+} , NO_3^- , y SO_4^{2-} fueron menos variables que NH_4^+ y K^+ . Estos patrones de variabilidad fueron consistentes dentro y entre tormentas. La baja variabilidad de NO_3^- , y SO_4^{2-} es probablemente debido a la deposición de partículas de polvo de esos iones como contaminantes de origen antropogénico. Mientras que la baja variabilidad de Ca^{2+} es debido a la deposición en seco de este ion en vientos moderados. Así mismo, la alta variabilidad de NH_4^+ y K^+ es probablemente el resultado de procesos biológicos. En dicho estudio se observó que el NH_4^+ es fuertemente retenido por el dosel vegetal mientras que el K^+ es fácilmente lixiviado de él. Por otro lado, existió baja variabilidad de volumen de precipitación efectiva entre y dentro de los eventos.

Usando una red de colectores para muestrear la precipitación efectiva de SO_4^{2-} bajo el dosel de árboles de *Picea* y *Abies* a diferentes altitudes se observó que los flujos de SO_4^{2-} fueron dos veces mayores en las altitudes superiores que en las inferiores (Lindberg y Owens, 1993).

López et al., (1994), estudiaron la entrada y salida de algunos nutrientes en ecosistemas de savanas, en el cual destaca que una de las principales entradas de nutrientes a los ecosistemas es la precipitación pluvial, y la pérdida o salida de los nutrientes está constituida principalmente por los escurrimientos de suelo, los cuales, en este tipo de regiones se

presentan en grandes cantidades resultando en pérdidas enormes de nutrientes. En dicho estudio, la precipitación pluvial jugó un papel importante en la entrada de algunos nutrientes como K y Ca. Pérdidas significativas resultaron a consecuencia de salidas de partículas del ecosistema, esto fue para el caso de P, Zn y Cu. Las concentraciones de K se incrementaron a lo largo de las épocas lluviosas. Para el caso de Mg en precipitación, este se mantuvo constante en los diferentes períodos, encontrando también que la concentración de algunos nutrientes cambió de una año a otro.

La composición química de la precipitación efectiva en árboles de maple rojo (*Acer Rubrum*) fue evaluada después de aplicar agua de lluvia simulada con niveles de pH de 5.2, 4.2 y 3.2 en cinco fechas distintas, encontrando que la composición del pH fue menos ácido en todos los casos después de pasar por el dosel de maple rojo. Así mismo, se encontró que la concentración de todos los elementos minerales en precipitación efectiva, excepto para K, se aumentó conforme se incrementó la acidez de la solución de agua de lluvia simulada. A este respecto, concluye que este incremento puede estar relacionado a la lixiviación foliar y remoción acelerada de materiales de la superficie foliar (Schier, 1987).

El agua de nube provee una oportunidad única para investigar el origen de las masas de aire, ya que representan el producto final de procesos naturales que conducen a la concentración de los contaminantes en pequeñas cantidades de agua. El material particulado soluble en un m³ de aire puede encontrarse condensado en un ml o menos de agua de nube durante los estados formativos de una nube orográfica. Investigaciones recientes han demostrado la importancia de las nubes como una fuente de agua para ecosistemas específicos además que contribuyen con sustancias tóxicas y con nutrimentos a los ecosistemas. Estas sustancias tóxicas se han detectado como una de las causas de incremento de la mortandad de los bosques en Europa (Padilla et al., 1996).

Correlaciones múltiples efectuadas por García et al., (1989) comparando el volumen de precipitación con la concentración de algunos nutrientes, encontraron que las concentraciones de Zn, Mg y Ca estuvieron estrechamente correlacionadas con el volumen de agua, aunque para el caso de Zn, no se observó tal efecto.

Sin embargo, algunos de los iones pueden ser removidos de las superficies de los vegetales pero otros pueden ser absorbidos por los tejidos de la planta (estructuras foliares principalmente). Hambuckers y Remacle (1993), mencionan que los procesos de lixiviación y absorción de nutrientes esta regulado por mecanismos osmóticos.

Andersson (1991), observó el comportamiento de la composición química de algunos iones en precipitación efectiva y en el agua que fluye por los tallos en *Quercus robur*, destacando estos sobre la química de los suelo y los patrones de la vegetación. Las concentraciones de Ca y Mg en precipitación efectiva fueron aproximadamente de 3 a 5 veces más altos que en la lluvia incidente y para el caso de K de 16 a 30 veces más alto. La concentración media de Mg y K en escurrimiento fustal excedieron las concentraciones de Mg y K en precipitación efectiva, pero en orden de magnitud y las concentraciones de Ca podrían rebasarlas hasta en 30 veces. Andersson concluye que la composición química del escurrimiento fustal afectó el suelo y la vegetación más que la precipitación efectiva, ya que cientos de litros, ricos en nutrientes pueden ser agregados en estos tipos de árboles por esta vía anualmente.

Estudiando los factores que afectan y controlan la precipitación efectiva, Brown y Lund (1994), llegan a la conclusión que ésta es influenciada principalmente por las partículas suspendidas en la atmósfera y las que se encuentran sobre las superficies de las copas de los árboles, así como también, por las interacciones químicas y biológicas que se dan entre la lluvia y el follaje.

Robson et al., (1994), estudiando la variación espacial en precipitación efectiva encontró que existieron diferencias en el volumen en las tormentas estudiadas y en los nutrientes analizados. En dicha investigación los iones tuvieron correlación entre uno y otro. Se observó también que el volumen mostró una correlación negativamente con los iones determinados. Dichos autores recomiendan la aleatorización de los colectores y muestras múltiples para obtener un mejor resultado en los análisis de los componentes químicos en precipitación efectiva.

La lixiviación de nutrientes mediante simulación de lluvia ácida aplicada a hojas de *Acer rubrum*, las cuales fueron perforadas para observar el lavado de nutrientes en hojas dañadas y no dañadas mostraron algunas diferencias significativas para algunos iones en hojas dañadas artificialmente principalmente para K, Ca y Mg así como absorción de NO_3^- y NH_4^+ . La lixiviación de nutrientes durante el periodo experimental mostró el flujo más alto al principio del mismo para todos los iones analizados excepto para Ca. Los resultados también demostraron que la lixiviación en hojas jóvenes es menor que en hojas maduras (Potter, 1991).

La química de la precipitación efectiva ha sido evaluada en diferentes regiones y tipos de vegetación. Arthur y Fahey, (1993), se enfocaron principalmente a estudiar los bosques Subalpinos de *Picea engelmannii* y *Abies lasiocarpa* encontrando la misma tendencia que en otros tipos de vegetación. En dicho trabajo, se observaron que las concentraciones de K, Ca, Na y Mg fueron más altos en precipitación efectiva con respecto a la precipitación pluvial. El enriquecimiento de K y Mg puede ser explicado por la alta concentración y movilidad de estos solutos en los tejidos de las plantas. Estos resultados indican la gran cantidad de nutrientes lixiviados del dosel, la entrada de nutrientes en forma de partículas de polvo y el lavado de la atmósfera a través de la precipitación pluvial.

El análisis para determinar la composición química de agua de nube fue estudiada por Sigmon et al., (1989). En dicha investigación se observó que la composición química de agua de nube estuvo principalmente enriquecida por H^+ , SO_4^{2-} , NH_4^+ y NO_3^- siendo estos últimos absorbidos por el dosel vegetal.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ambiente físico

3.1.1 Localización y Descripción del Área de Estudio

El área experimental en la cual se llevó a cabo el desarrollo de la presente investigación, se encuentra ubicada dentro del campus de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, localizada a 8 km al sur de Linares, Nuevo León, dentro de las coordenadas geográficas 24° 47' latitud norte y 99° 32' longitud oeste, con una elevación de 350 msnm (SPP-INEGI, 1986), constituyéndose el área del típico matorral tamaulipeco. Originalmente éstas áreas estaban cubiertas del típico matorral mediano y alto espinoso-subinorme, que en su mayoría se eliminó para cambiar el uso de suelo forestal a ganadero y agrícola, conservándose algunas áreas del matorral como reserva y protección, los que son utilizados para estudios diversos (Foroughbakhch y Peñaloza, 1988).

3.1.2 Vegetación

La vegetación más común de la Planicie Costera del Golfo Norte está constituida por una gran diversidad de comunidades vegetales desde la cual incluye arbustiva, herbácea y arbórea. La vegetación dominante observada en el área de estudio donde se realizó esta investigación destacan las siguientes especies: *Acacia berlandieri*, *A. Farnesiana*, *A. Greggii*, *A. rigidula*, *Celtis pallida*, *Condalia hookeri*, *Cordia boissieri*, *Diospyros texana*, *Forestiera angustifolia*, *Helietta parvifolia*, *Leucophyllum texanum*, *Mimosa biuncifera*, *Pithecellobium pallens*, *P. ebano*, *Zanthoxylum fagara*, entre otras, denominada comúnmente “matorral espinoso tamaulipeco” (COTECOCA-SARH, 1973). Estas se encuentran generalmente en forma asociada entre si o incluso pequeñas áreas con una sola especie. Entre el estrato herbáceo podemos encontrar especies tales como *Bouteloua trifida*, *Tridens texanum*, *Hilaria belangre*, *Eragostis oxilepis*, *Leptochoa dubia*, *Leptoloma cognatum* (Villegas, 1972).

3.1.3 Clima

El clima de ésta región de acuerdo a la clasificación de Köppen (modificado por García, 1973; SPP, 1981) está caracterizado como: (A) Cx' a (e), semicálido-húmedo, con días muy calurosos en época de verano. Sin embargo, es muy frecuente observar temperaturas de 14.7

°C en el mes de Enero y hasta temperaturas de 40°C en el mes de Agosto. La precipitación promedio anual de ésta región es de 740 mm de los cuales el 80% ocurre en los meses de Mayo - Octubre. Aproximadamente el 50% de la precipitación en esta región es de tormentas de tipo convectivo (Návar, 1986).

Las condiciones ambientales diarias de precipitación y temperatura (máximas y mínimas) registradas durante el periodo experimental de esta investigación se ilustran en la Figura 1.

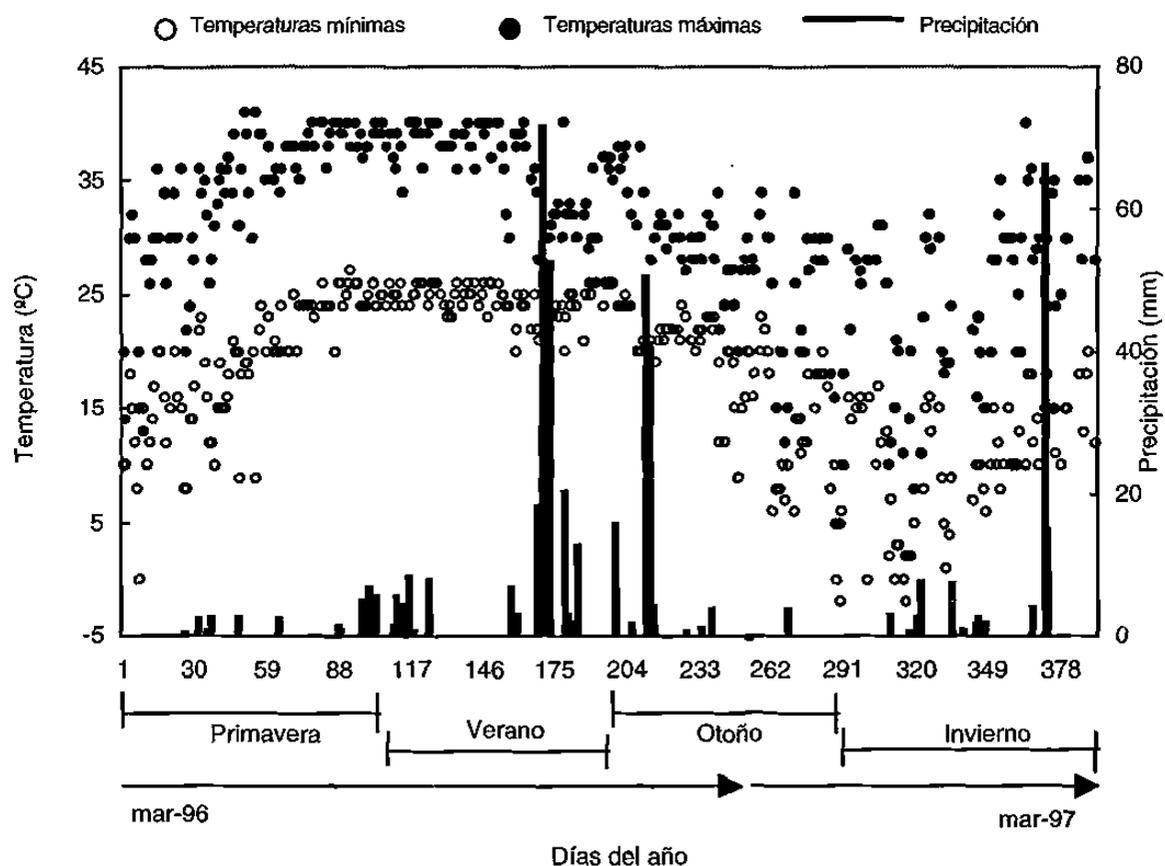


Figura 1 Precipitación y temperaturas (máximas y mínimas) diarias registradas de Marzo 1996 a Marzo 1997.

3.1.4 Suelo

Los suelos del área están caracterizados por ser de la clase vertisol, donde dominan las arcillas de tipo montmorillonítico de la clase 2:1, los cuales se expanden y contraen marcadamente con los cambios en el contenido de humedad, desarrollando grandes grietas verticales. Poseen un profundo horizonte A (30-100 cm) y su estructura en forma de bloques o

prismática (Foroughbakhch y Heiseke, 1990). El pH de esta clase de suelos es moderadamente alcalino y el contenido de nutrientes para algunos muestra deficiencias, sobre todo para N y P. De la misma manera, el característico alto contenido de carbonato de calcio en este tipo de suelos se refleja en la gran abundancia de este elemento (Foroughbakhch y Peñaloza, 1988).

En el período de estudio se realizaron dos muestreos de suelos. El muestreo de suelo se efectuó bajo las copas de los cuatro árboles que fueron seleccionados para coleccionar la precipitación efectiva, en cada una de las cuatro especies. Así mismo, se coleccionaron muestras de suelo en el lugar donde se coleccionó la precipitación incidente.

El Cuadro 1 muestra las concentraciones de nutrientes determinados en dos fechas en cinco sitios. Los análisis se realizaron a dos profundidades. El objetivo de este análisis fue documentar las concentraciones disponibles durante el periodo experimental.

Cuadro 1 Concentración de elementos minerales en el suelo, determinados en dos fechas y en dos profundidades durante el periodo experimental.

Fecha	Sitio	Prof. (cm)	Nutrientes minerales ($\mu\text{moles/gpss}$)							
			K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	
01/Jun/96	Testigo	0-30	6.8980	284.4123	7.6909	0.1090	0.0087	0.0043	0.1414	
		30-60	5.7399	285.1705	6.6190	0.1159	0.0101	0.0028	0.1119	
A. rigidula	A. rigidula	0-30	8.1776	299.5764	8.3238	0.1069	0.0091	0.0045	0.1283	
		30-60	5.3617	287.4451	7.7718	0.1232	0.0089	0.0042	0.1201	
A. berlandieri	A. berlandieri	0-30	7.5192	289.7197	8.3888	0.1065	0.0091	0.0069	0.1804	
		30-60	6.0370	297.3018	7.8854	0.1158	0.0094	0.0049	0.1402	
P. ebano	P. ebano	0-30	7.2457	288.9615	8.4050	0.0985	0.0087	0.0063	0.1607	
		30-60	6.4219	285.1705	6.7164	0.0992	0.0093	0.0050	0.1205	
P. pallens	P. pallens	0-30	7.4247	294.2690	8.9733	0.1033	0.0088	0.0092	0.1665	
		30-60	6.5266	282.8959	7.7880	0.0913	0.0091	0.0059	0.1230	
01/Oct/96	Testigo	0-30	5.4984	249.6546	6.5513	0.0684	0.0105	0.0048	0.0713	
		30-60	5.9958	263.4817	9.7868	0.0916	0.0129	0.0115	0.1678	
A. rigidula	A. rigidula	0-30	5.7932	264.0578	7.4978	0.0800	0.0123	0.0086	0.0767	
		30-60	5.0484	272.6997	7.7044	0.0978	0.0125	0.0046	0.0943	
A. berlandieri	A. berlandieri	0-30	8.1987	253.1114	8.7542	0.0901	0.0126	0.0107	0.0995	
		30-60	4.5826	250.8069	7.4634	0.0115	0.0111	0.0048	0.0999	
P. ebano	P. ebano	0-30	8.8724	254.8398	9.3393	0.0931	0.0120	0.0078	0.0903	
		30-60	5.4011	264.0578	7.2397	0.0867	0.0133	0.0056	0.0979	
P. pallens	P. pallens	0-30	8.0013	253.6875	10.389	0.0895	0.0117	0.0118	0.0903	
		30-60	5.0431	259.4488	9.1844	0.0847	0.0128	0.0059	0.1137	

3.2 Material vegetal

Las cuatro especies vegetales que se estudiaron en la presente investigación (Cuadro 2) son especies representativas de la región y son también importantes en el sentido de uso para la recuperación de áreas o suelos degradados, de importancia ecológica, así como de importancia forrajera. Estas especies se establecieron hace 14 años en parcelas experimentales contiguas del tipo "monocultivo". Cada parcela experimental tiene una dimensión de 8 m x 8 m con espaciamentos entre plantas de 2 m. La parcela útil estuvo conformada por cuatro plantas centrales bajo competencia completa.

Cuadro 2 Nombre científico, nombre común y familia de las especies estudiadas.

Nombre Científico	Nombre Común	Familia
<i>Acacia rigidula</i> (Benth)	Chaparro prieto	Leguminosae
<i>Acacia berlandieri</i> (Benth)	Guajillo	Leguminosae
<i>Pithecellobium ebano</i> (Berl) Muller	Ebano	Leguminosae
<i>Pithecellobium pallens</i> (Benth) Standl.	Tenaza	Leguminosae

3.2.1 Descripción de las especies estudiadas

A continuación se describen generalidades morfológicas para cada una de las especies estudiadas (Estrada y Marroquin, 1990):

3.2.1.1 *Acacia rigidula* Benth.

Arbusto intrincadamente ramificado, con una altura que fluctúa entre 0.7-6 m; las ramas están armadas con espinas rectas, pareadas con longitud de 1.5-4.5 cm de largo. Hojas alternas, bipinnado compuestas de 1.5-3.8 cm de largo; pecíolo 1.5-3 mm de largo; pinnas 1 par por hoja, 0.9-2.5 cm de largo; folíolos de 2-4 pares por pinna; oblongo - ovalados de 0.7-14 mm de largo y con una base ligeramente atenuada o asimétrica. La inflorescencia está dispuesta en racimos espigados, agrupados en conjuntos de 3-6, de 2-3.5 cm de largo. El fruto es una vaina linear de 4-9.5 cm de largo y de 4.5-5.5 mm de ancho, curvado, café oscuro o negruzca. Su distribución abarca desde 360 a 580 msnm, y se encuentra asociada frecuentemente con *Acacia farnesiana* y *Pithecellobium pallens*.

3.2.1.2 *Acacia berlandieri* Benth.

Arbusto de 1-2.5 m de alto, ramificado desde la base con numerosos tallos, espinas pequeñas, rectas de 2 mm de largo; hojas compuestas, bipinnadas de 7-12 cm de largo; pecíolo de 1.5-2 cm de largo; pinnas de 6-9 pares por hoja de 3-4.9 cm de largo; folíolos de 26-30 pares por pinna. Las inflorescencias están dispuestas en cabezuelas amarillas de 1-1.3 cm de diámetro; pedúnculos 9-13 mm de largo. El fruto es una vaina de 7-12 cm de largo, oblonga recta o ligeramente curvada con dehiscencia longitudinal, explosiva el fruto queda largo tiempo adherido a las infrutescencias. Se distribuye en áreas de matorral en la planicie, común en matorral submontano y en bosques de encino, en alturas de 360 a 1500 msnm.

3.2.1.3 *Pithecellobium ebano* (Berl.) Muller.

Arbusto o árbol, 4-10 m de altura, ramas dispuestas fuertemente en zigzag, armadas con espinas nodales, pareadas, 8-13 mm de largo, rectas. Hojas alternas bipinnado compuestas, 2.5-4.2 cm de largo, pinnas 2-3 pares por hoja, 1-2.5 cm de largo, con 3-6 pares de folíolos por pinna, 6-10 mm de largo, 4-5 mm de ancho, oblongos, glabros y/o esparcida y diminutamente ciliados en los bordes. Las inflorescencias están dispuestas en racimos espigados, 2-5 cm de largo, cilíndricas, densas. El fruto es una vaina de 6-13 cm de largo y de 1.8-3 cm de ancho, ligeramente aplanado. Las valvas coriáceas pueden ser rectas a ligeramente curvadas, persistente por largo tiempo, tardíamente dehiscente, internamente septada. Las semillas son café o café-rojizo. Es frecuente en suelos francos y bien drenados en zonas bajas. El rango de distribución fluctúa de los 250 a 600 msnm.

3.2.1.4 *Pithecellobium pallens* (Benth.) Standl.

Arbusto de 4-5 m de altura, ramas armadas con espinas nodales de 8-19 mm de largo; hojas alternas, bipinnado compuestas, 5-11 cm de largo, pinnas 4-7 pares por hoja de 2-4.5 cm de largo; folíolos de 14-22 pares por pina, oblongos, 4.5-6.5 mm de largo y de 1.1-1.5 mm de ancho, ligeramente oblicuos, diminuta y esparcidamente pubescentes. Las inflorescencia están dispuestas en cabezuelas esféricas, blanquecinas de 1.5-2 cm de diámetro, axilares, o en racimos terminales. El fruto es una vaina oblonga, aplanada, 6-9 cm de largo, 9-12 mm de ancho, dehiscente, ápice terminado en un pico corto, valvas engrosadas en los márgenes, color café claro u oscuro. Abundante en las áreas de la planicie, codominante con varias especies del género *Acacia* en extensas zonas del matorral. Se encuentra principalmente en suelos poco profundos.

3.2.2 Fenología vegetal

Las características fenológicas tales como inicio de brotes, presencia foliar, y estados reproductivos (floresy/o frutos), de las especies estudiadas fueron observadas a intervalos de 15 días durante el periodo experimental (15 Marzo de 1996 al 15 de marzo de 1997). Cabe mencionar que solo fueron determinaciones en base a presencia y abundancia realizadas de manera visual.

3.3 Descripción del experimento

3.3.1 Precipitación incidente

El registro de la precipitación incidente o precipitación pluvial fue llevada a cabo cada vez que se presentó un evento de lluvia durante el transcurso de la investigación; la cual comprendió del 15 de Marzo de 1996 al 15 de Marzo de 1997.

La precipitación incidente fue evaluada por medio de cuatro colectores (repeticiones) de polietileno de 20 cm de diámetro, conectados a botes de polietileno de 4.0 L y soportados por una caja de madera. El embudo fue cubierto con una malla de poliefibra para impedir la entrada de insectos, hojarasca y partículas extrañas. Los embudos permanecieron fijos y expuestos a la atmósfera durante todo el transcurso de la investigación. Los colectores fueron colocados a 42 cm por encima de la superficie del suelo para evitar el salpique de las gotas de lluvia y evitar la contaminación con partículas de suelo. Estos colectores fueron ubicados en un área adyacente a las parcelas experimentales.

Las muestras de agua de lluvia fueron colectadas dentro de las siguientes 12 horas después de finalizar el evento de lluvia y en un período no mayor de 24 horas. Los embudos y colectores de polietileno fueron lavados periódicamente con ácido clorhídrico y agua bidestilada, con el objeto de mantener libre de partículas que pudieran alterar la química del agua.

3.3.2 Precipitación efectiva

El registro de agua de lluvia que pasó a través del dosel vegetal (precipitación efectiva) fue colectada en cada evento de lluvia y en cada parcela experimental. Para ello, se colocaron bajo las copas de cuatro árboles seleccionados, los embudos de polietileno con su respectivo

contenedor y material de sostén. Un colector por cada árbol fue utilizado para interceptar el agua que pasó a través del dosel de la planta.

Previamente a esto, se observaron las coberturas de las copas de los árboles, así como su estructura. El objetivo de este procedimiento fue elegir el lugar más indicado en el cual se colocarían los colectores. En base a que la mayoría de los árboles de las especies estudiadas tenían áreas de la corona ($4.76 \pm 1.76 \text{ m}^2$) y alturas ($2.98 \pm 0.83 \text{ m}$) muy similares, se optó por ubicar el colector a una distancia de 45 cm del tallo principal de cada árbol orientado hacia cada uno de los cuatro puntos cardinales. Los embudos se colocaron a una altura de 42 cm por arriba de la superficie del suelo.

Los colectores y contenedores fueron previamente lavados con ácido clorhídrico y agua bidestilada antes de cada evento para remover de ellos las partículas que pudieran contaminar y alterar la composición química de la lluvia colectada, así mismo, los colectores se distribuyeron aleatoriamente en cada evento de lluvia en torno a la planta y en base a los cuatro puntos cardinales.

Las muestras generalmente fueron colectadas dentro de las siguientes 12 horas después de finalizar el evento de lluvia y en un período no mayor de 24 horas y a la misma frecuencia que la precipitación incidente. Para eventos menores de 1 mm, las muestras de cada especie y repetición fueron colectadas y mezcladas en una sola repetición para ser analizadas conjuntamente. No obstante, se midió el volumen individual de cada repetición. Durante los períodos de altas precipitaciones, eventos de lluvias continuos entre un día y otro, las colectas se realizaron cada 24 horas con el objeto de tener información diaria de la precipitación que se presentó.

3.3.3 Colecta y preservación de las muestras de agua de lluvia

La precipitación incidente y la precipitación efectiva colectada fueron trasladadas al laboratorio dentro de las 12 y 24 horas de haber ocurrido el evento de lluvia para registrar el volumen colectado, pH y conductividad específica.

Entre cada medición de volumen, la probeta fue lavada con agua bidestilada para evitar una posible contaminación de la muestra anterior a la posterior. Para hacer esto más confiable aún, se utilizaron cuatro probetas para medir los cuatro volúmenes de cada especie, así como para la precipitación. Una secuencia en las mediciones de volumen, pH y conductividad

específica fue establecida en cada evento, midiendo primero los parámetros anteriormente mencionados en *A. rigidula*, *A. berlandieri*, *P. ebano* y *P. pallens*.

Una vez obtenido el volumen de todas las repeticiones (contenedores), la muestra se agitó durante algunos segundos y se obtuvo de cada muestra una submuestra. Esta fue depositada en recipientes de plástico (previamente lavados con ácido clorhídrico y agua bidestilada). Una vez obtenida esta submuestra se prosiguió a obtener de ellas pH y conductancia específica, el resto del agua colectada se descartó.

La medición del pH fue mediante el uso de un medidor de pH con electrodo integrado (Corning modelo 340). El electrodo fue lavado y calibrado periódicamente entre grupos de muestras. La conductancia específica ($\mu\text{mhos/cm}$) fue determinada por un conductivímetro (Hanna, modelo HI8820). Posteriormente, las muestras fueron filtradas utilizando papel filtro (Whatman No. 4). En seguida, las muestras fueron almacenadas por dos semanas en refrigeración a una temperatura de 4°C para prevenir cambio en volumen y actividad microbiana.

3.3.4 Muestreo de tejido foliar

El tejido foliar maduro de *A. rigidula*, *A. berlandieri*, *P. ebano* y *P. pallens* fue analizado para determinar la concentración de macro y microelementos.

El follaje de las especies anteriormente mencionadas fue colectado de ocho plantas (repeticiones) previamente etiquetadas en la plantación. Los análisis foliares se llevaron a cabo del 9 de Octubre de 1996 al 13 de Enero de 1997, realizándose dichos muestreos a intervalos de tres semanas.

3.3.5 Análisis químicos

Después de permanecer los extractos de digestión foliar y muestras de agua de lluvia en refrigeración por dos semanas, estas fueron removidas y se mantuvieron a temperatura ambiente por 15 minutos. Posteriormente, las muestras se agitaron con la finalidad de homogenizarlas.

Para determinar la concentración de cada elemento en muestras foliares (micromoles por gramo de peso, $\mu\text{moles/gps}$) y deposición de nutrientes en muestras de agua (en miligramos

por litro, mg/L; milimoles por hectárea, mmoles/Ha, o kilogramos por hectárea, Kg/Ha) se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica (marca Varian, modelo SpectrAA-200).

En el Cuadro 3 se ilustran los parámetros optimizados del espectrofotómetro que se utilizaron para cuantificar cada elemento. Partiendo de estándares comerciales de cada elemento, se obtuvo una curva estándar para cuantificar la concentración de dicho elemento en el extracto de cada especie o muestra de agua de lluvia de cada repetición y evento registrado.

Cuadro 3 Parámetros optimizados del espectrofotómetro que se utilizaron para determinar la concentración de los elementos.

Elemento mineral	Longitud de onda λ (nm)	Corriente de lámpara ¹ (mA)	Ancho de ranura (nm)	Flujo (L/min)		Estequiometría de la flama
				combustible ²	oxidante ³	
Ca	422.7	10.0	0.5	6.35	11.0	reductora
K	76.5	5.0	2.0	2.00	13.5	oxidante
Na	589.0	5.0	2.0	2.00	13.5	oxidante
Mg	285.2	4.0	2.0	2.00	13.5	oxidante
Cu	324.8	4.0	2.0	2.00	13.5	oxidante
Fe	248.3	5.0	2.0	2.00	13.5	oxidante
Mn	279.5	5.0	2.0	2.00	13.5	oxidante
Zn	213.9	5.0	2.0	2.00	13.5	oxidante

¹ Lámpara de cátodo hueco. ² Acetileno (grado absorción atómica, AA). ³ Oxido nitroso (Ca) y aire (K, Na, Mg, Cu, Fe, Mn, y Zn).

3.3.6 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental que se utilizó para llevar a cabo el análisis estadístico de los datos de concentración, pH y conductividad específica, por evento de lluvia, fue de un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. El modelo estadístico que se usó en este estudio fue (Steel y Torrie, 1980):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$i = 1, 2 \dots, t=5$$

$$j = 1, 2 \dots, r=4$$

donde:

Y_{ij} = representa la concentración del elemento en el tratamiento i en la repetición j .

μ = representa la concentración media global.

τ_i = representa el efecto del tratamiento i .

\mathcal{E}_{ij} = representa el error experimental (o componente aleatorio) asociado a la observación ij .

Los errores son independientes, y están normalmente distribuidos con media 0 y varianza σ^2 , es decir $\mathcal{E}_{ij} \sim NI(0, \sigma^2)$.

Las concentraciones de cada elemento mineral, cantidad de precipitación, pH y conductividad específica por evento de lluvia, fueron sometidos a un análisis de varianza usando el paquete estadístico SPSS, versión 5.01, 1992.

El procedimiento estadístico de Tukey, el cual se basa en la distribución de rango estudentizado, fue la prueba estadística que se empleo para detectar diferencias entre los tratamientos para cada una de las variables. El procedimiento consiste en calcular el valor crítico y compararlo a una diferencia de pares de medias con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (Steel y Torrie, 1980).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se presentan los resultados e interpretaciones de la concentración y flujos de macro (Ca, K, Mg y Na) y micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) incorporados al suelo vía precipitación incidente (testigo) y precipitación efectiva (lluvia que pasó a través del dosel vegetal). Estos resultados están presentados en términos de flujos medios anuales, estacionales y por evento de lluvia registrado. Adicionalmente, se ilustra la interacción significativa de la deposición de nutrientes considerando las especies vegetales estudiadas y la estación de crecimiento. Por otro lado, también se incluyen aspectos hidrológicos de la precipitación incidente y efectiva, tales como cantidad de precipitación registrada, número de eventos registrados, frecuencia de eventos de lluvia, cantidad de precipitación interceptada de cada una de las especies estudiadas, entre otras.

4.1 Precipitación incidente

Durante el periodo experimental, 15 de Marzo de 1996 al 15 de Marzo de 1997 se registró un total de 52 eventos de lluvia sumando un total de 522.8 mm de precipitación. En el (Cuadro A1) se ilustra la fecha y cantidad de precipitación incidente en cada tormenta. Los eventos de precipitación incluyeron del tipo orográfico y convectivo principalmente. Adicionalmente se registraron dos tormentas eléctricas y dos eventos de lluvia influenciados por efectos de huracanes (el primero el día 22 de Agosto, huracán "Dolly" y el segundo el 02 de Octubre, llamado "Herman" ambos presentados en 1996).

Un evento de lluvia fue definido, al igual que Puckett (1991), como cualquier periodo medible de precipitación pluvial que no fue precedido o seguido por otro periodo medible de precipitación dentro de las 24 horas.

En la Figura 2 se ilustra la cantidad de precipitación incidente de cada uno de los 52 eventos registrados. La precipitación menor y mayor observada fue de 0.46 y 71.5 mm respectivamente, con un promedio anual de 10.05 ± 16.62 .

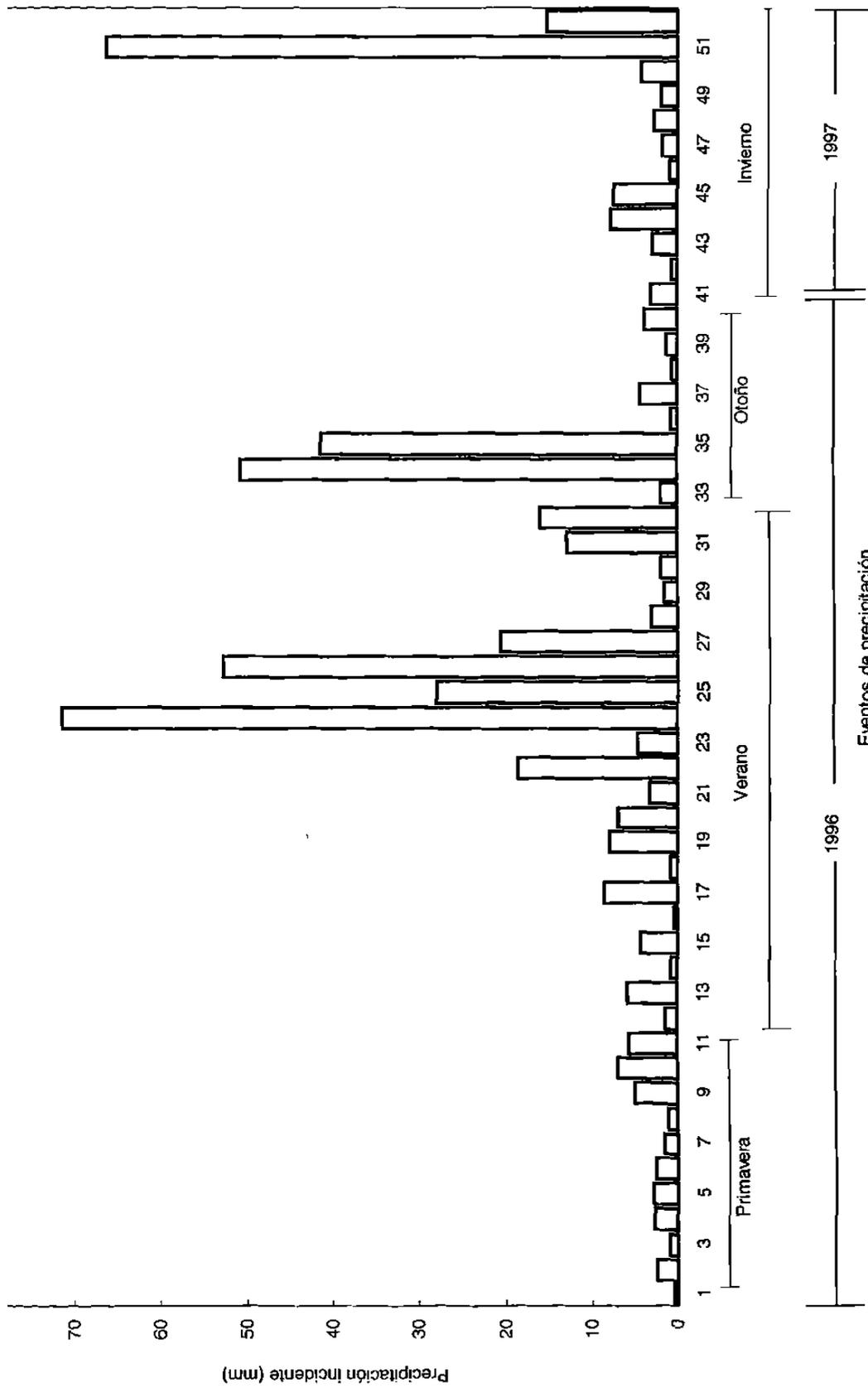


Figura 2 Precipitación incidente registrada de los 52 eventos de lluvia.

El histograma de frecuencias de precipitación muestra que más del 60% de las precipitaciones ocurridas fueron menores de 5 mm. Así mismo, se observa que alrededor del 20% se encuentran entre 5 y 10 mm de precipitación; sin embargo, lluvias mayores de 50 y hasta 70 mm ocurrieron en este periodo, pero con frecuencias relativamente bajas (menores de 5%). La lluvia máxima registrada fue de 71.5 mm la cual ocurrió el 21 de Agosto de 1996 (huracán "Dolly" que se presentó en ese mes) y la mínima ocurrió el 26 de Marzo del mismo año con una precipitación de 0.46 mm.

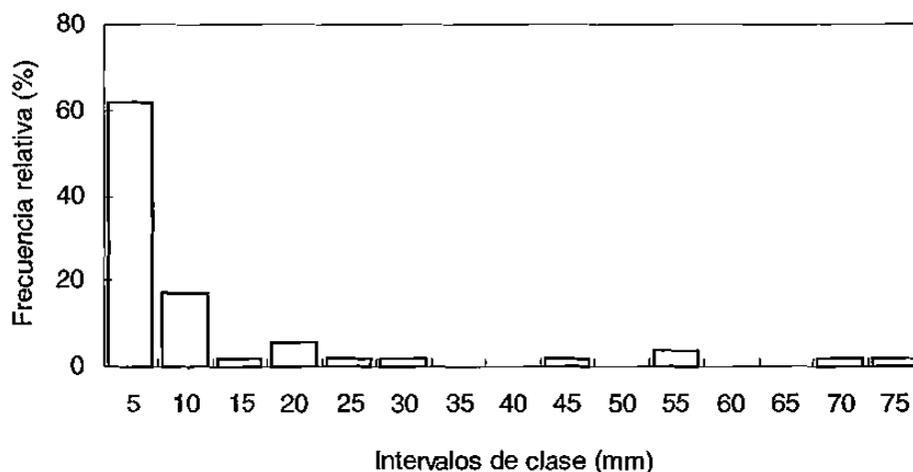


Figura 3 Histograma de frecuencias de precipitación incidente.

La distribución mensual de la precipitación incidente se presenta en la Figura 4. A manera general, el 63% de la precipitación ocurrió de Junio a Octubre. La Figura 4 también revela que el mes de Junio fue el más lluvioso ya que alrededor del 22% del total de eventos de lluvia se registraron en ese mes. Los meses de Mayo y Noviembre fueron los meses más secos con solamente un evento de precipitación cada uno. En el mes de Diciembre se presentaron deposiciones de agua en los colectores en forma de rocío; las cuales no fue posible medir; por ello mismo, bajo la copa de los árboles no se colectó precipitación alguna. Esta deposición de humedad fue interceptada por el dosel vegetal.

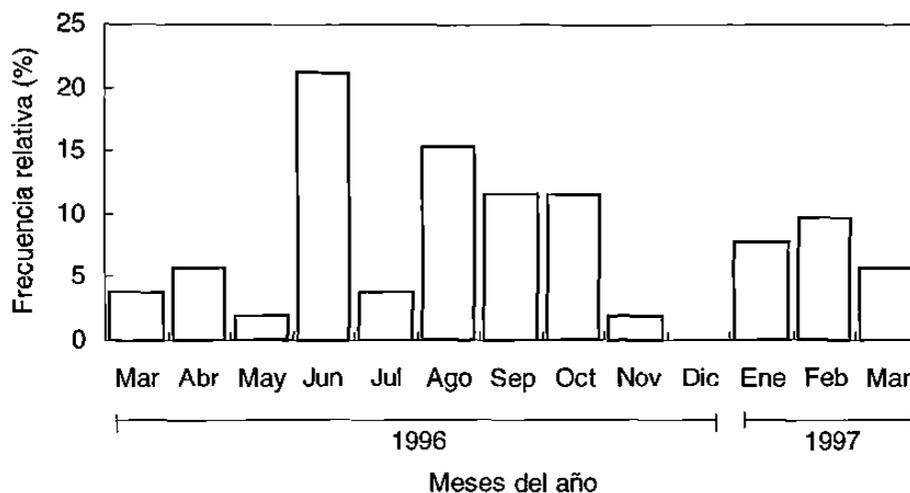


Figura 4 Frecuencia relativa mensual de precipitación incidente

En la Figura 5 se ilustra la distribución mensual de la precipitación incidente durante el periodo experimental. En dicha Figura se puede apreciar que los meses más secos de 1996 fueron Marzo (2.9 mm), Mayo (2.6 mm) y Diciembre (0.0 mm) y de 1997 fueron Enero (14.3 mm) y Febrero (14.9 mm). En cambio, los meses más lluviosos de 1996 fueron Agosto (205.9 mm) y Octubre (98.9 mm) y de 1997 fue el mes de Marzo (85.4 mm).

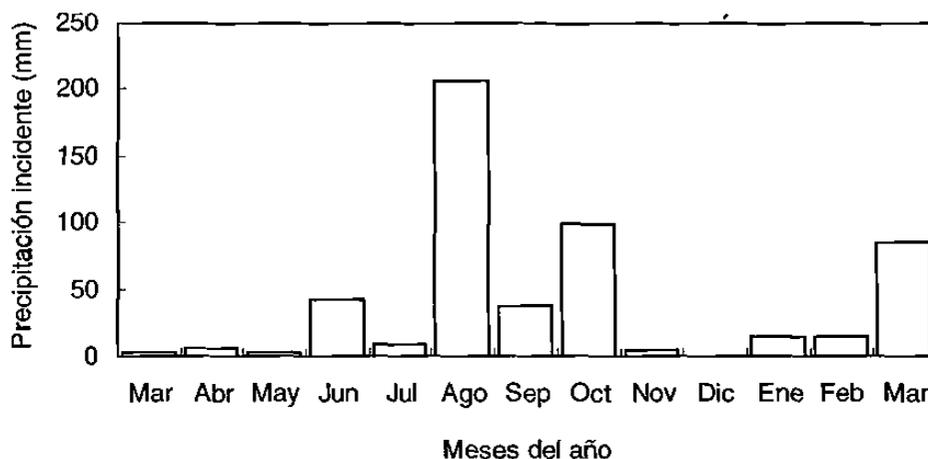


Figura 5 Distribución mensual de la precipitación incidente durante el periodo experimental.

4.2 Relación de precipitación incidente y precipitación efectiva

La cantidad de precipitación efectiva fue modelada como una función de la precipitación incidente a través de la siguiente ecuación $Y = \beta_0 + \beta_1 (x)$. Donde Y = cantidad de precipitación efectiva; β_0 =intercepta en el eje Y ; β_1 =pendiente; x =cantidad de precipitación incidente (Pressland, 1973; Teklehaimanot y Jarvis, 1991). Esta ecuación describe la relación entre la precipitación incidente y precipitación efectiva, pero no toma en cuenta los efectos de las diferencias de intensidad de lluvia, duración y distribución, cambios estacionales de clima, o algunas otras variables como características de las especies.

En la Figura 6 se muestran la relación que existe entre la precipitación incidente (mm) y la precipitación efectiva (mm) en las cuatro especies estudiadas. En dicha Figura se incluyen los intervalos de confianza al 95%, donde claramente se observa homogeneidad en las observaciones. Así mismo, se observa que existe un alto grado de correlación entre la precipitación incidente y la precipitación efectiva. En las Figuras donde no se aprecia la línea de ajuste es porque los intervalos de confianza se sobrepone a ella. Tal vez sea efecto de la escala (como lo muestran las Figuras), no obstante, se observó menor variabilidad de precipitación efectiva en eventos de baja precipitación incidente. Este efecto podría también atribuirse a una posible homogeneidad en lluvias menores o probablemente a la presencia de pocos vientos en el ambiente.

Respecto al género *Acacia*, las relaciones entre precipitación incidente y precipitación efectiva se observa que dichas especies presentaron correlaciones sensiblemente diferentes, esto podría ser a causa de que las especies muestran características morfológicas un poco diferentes, ya que la R^2 de ambas es diferente, obteniendo el mejor ajuste en el modelo *A. berlandieri* con 0.9957, mejor que el de *A. rigidula* de 0.9917.

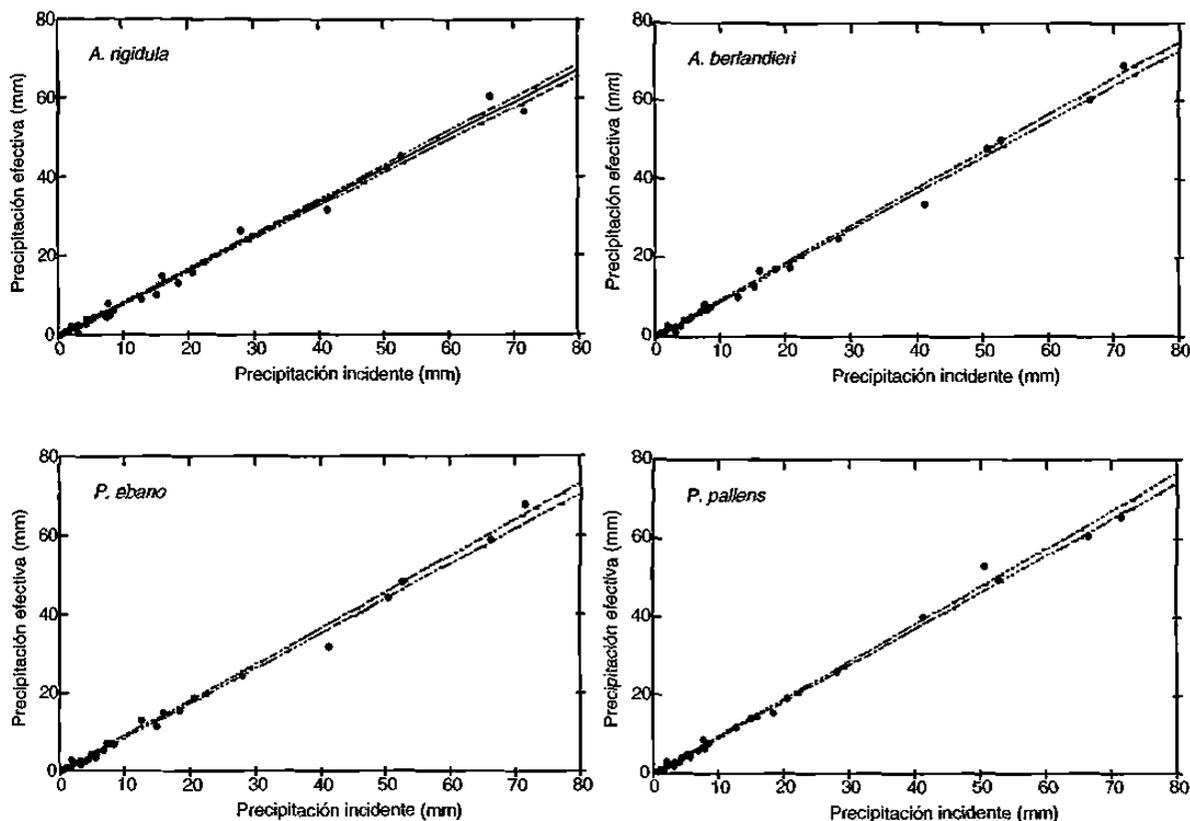


Figura 6 Relación entre precipitación incidente y precipitación efectiva en las cuatro especies estudiadas.

Por otro lado en la especie *A. berlandieri* se observó que en algunos eventos de lluvia, la precipitación efectiva fue mayor que la precipitación incidente. Esto podría ser debido a las características intrínsecas de la especie, tales como forma y disposición de las hojas y ramas, o bien son adaptaciones que ha desarrollado la especie para conducir el agua hacia la parte inferior tronco como una manera de utilizar eficientemente la escasa (Slatyer, 1963; Návar, 1993).

El mismo patrón en la precipitación efectiva registrada para el género *Pithecellobium* fue observado. Por ejemplo, la especie *P. pallens* mostró también en algunos eventos que la precipitación efectiva supera a la precipitación incidente. Una explicación puede ser debido a que ésta especie tiene su copa más abierta y menos densa que las demás. Así mismo, fue la especie que menor cobertura foliar presentó (3.18 ± 0.63) durante el periodo de estudio, ya periódicamente se efectuaron observaciones fenológicas de cada especie.

El ajuste de los modelos de regresión lineal entre la relación de precipitación efectiva y precipitación incidente se ilustra en la Figura 7. En el Cuadro 4 se presentan los coeficientes del modelo de regresión para cada especie estudiada.

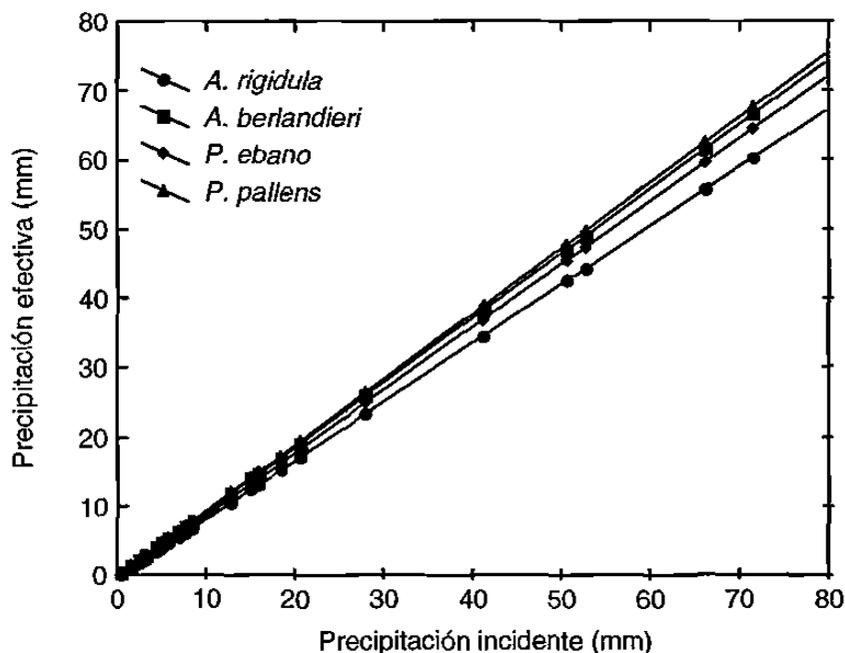


Figura 7 Ajuste de los modelos precipitación efectiva de las cuatro especies.

El Cuadro que a continuación se muestra reporta algunos parámetros de la regresión, los cuales explican el comportamiento de la variación de las observaciones. En el se observan diferencias mínimas en los ajustes del modelo en cada una de las especies (R^2), así como diferencias en las interceptas principalmente, y poca variación en el parámetro que representa la pendiente del modelo.

Cuadro 4 Coeficientes de cuadrados mínimos que estiman la precipitación efectiva en cada especie estudiadas como una función de la precipitación incidente (n=52).

Especie	Coeficientes de regresión			
	R^2	β_0	β_1	Sx
<i>A. rigidula</i>	0.9917	-0.3304	0.8460	1.2853
<i>A. berlandieri</i>	0.9957	-0.0678	0.9304	1.0144
<i>P. ebano</i>	0.9943	-0.4000	0.9059	1.1330
<i>P. pallens</i>	0.9958	-0.0437	0.9447	1.0142

De los resultados presentados en la Figura 7 y Cuadro 4 se puede concluir que la precipitación efectiva en *A. rigidula*, *A. berlandieri*, *P. ebano* y *P. pallens* representó el 84.6%, 93.0%, 90.5% y 94.5%, respectivamente de la precipitación incidente o anual registrada (522.8 mm). Adicionalmente, el ajuste de los modelos con los datos observados fue de considerable precisión ya que los coeficientes de determinación en las cuatro especies estudiadas se mantuvieron en el orden del 991.1 al 99.5%. No obstante, no se realizaron pruebas de comparación entre los parámetros ($\beta^{\prime s}$) de cada especie.

4.3 Relaciones de intercepción

De la misma manera, la estimación de la intercepción de lluvia por el dosel vegetal de las especies fue evaluada a través de cuadrados mínimos, siguiendo el modelo de regresión lineal de la forma $Y = \beta_0 + \beta_1(x)$ (Pressland, 1973; Herwitz, 1985).

La intercepción del agua de lluvia por el dosel vegetal, se estimó con la siguiente ecuación:

$$I = P_t - P_n \quad (2)$$

donde;

I = intercepción (mm).

P_t = precipitación incidente (mm).

P_n = precipitación efectiva (mm).

En la Figura 8 se muestran las relaciones observadas entre la precipitación incidente y la intercepción (mm) en las cuatro especies estudiadas. En dicha Figura se muestra también los intervalos de confianza al 95%, observándose que conforme se incrementa la precipitación incidente, mayor variación en la intercepción es esperada. Por lo tanto, los intervalos de confianza tienden a ser más amplios.

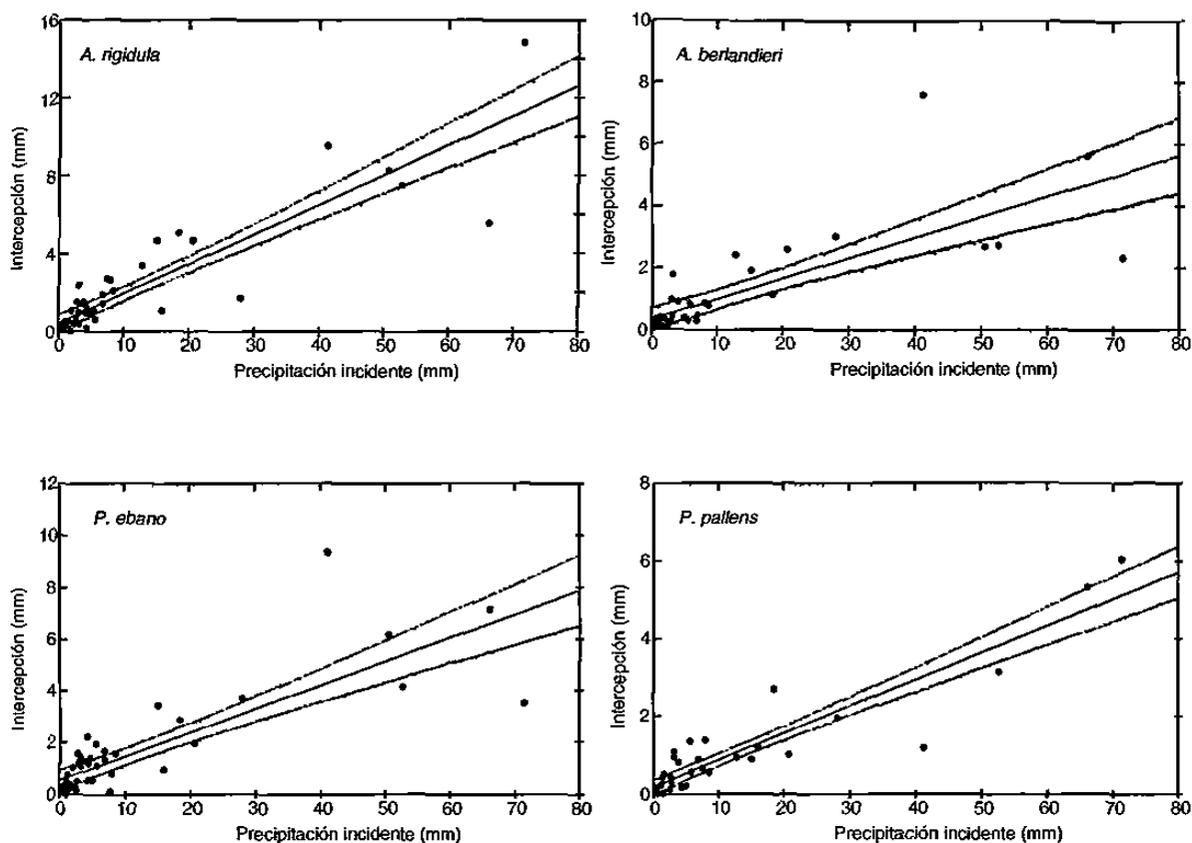


Figura 8 Relación entre precipitación incidente e interceptación en las cuatro especies estudiadas.

El Cuadro 5 muestra la cantidad de precipitación total incidente (mm) durante el periodo experimental, precipitación efectiva (mm) e interceptación (mm). A manera general la especie *P. pallens* fue la que menor porcentaje de interceptación mostró durante el periodo experimental. Esto puede ser explicado a que durante el transcurso del experimento no presentó estructuras foliares, ya que de Marzo a principios de Agosto fueron meses relativamente secos, por lo tanto el menor índice foliar observado podría ser la explicación de esta escasa interceptación.

Cuadro 5 Características hidrológicas de las especies estudiadas en relación precipitación efectiva e intercepción.

Clase de precipitación	mm registrados	%	
		Precipitación	Intercepción
Incidente ¹	522.88		
Precipitación efectiva ¹			
<i>A. rigidula</i>	425.18	81.31	18.69
<i>A. berlandieri</i>	482.29	92.23	7.77
<i>P. ebano</i>	452.93	86.62	13.38
<i>P. pallens</i>	491.73	94.04	5.96

¹ Registro de 52 eventos de lluvia.

La Figura 9 ilustra los modelos de regresión ajustados donde se aprecia la relación existente entre la precipitación incidente e intercepción en las especies estudiadas, donde se observa que al incrementarse la cantidad de precipitación pluvial, se incrementa también la intercepción. Paralelamente a este incremento, los intervalos de confianza se hacen más amplios, lo cual indica que el modelo se ajusta mejor para eventos de lluvias de bajas precipitaciones que para tormentas de alta precipitación. *A. rigidula* fue la especie que mayor cantidad de agua de lluvia interceptó, esto podría deberse al índice foliar de la especie, (no cuantificado en este estudio) o a la forma y distribución de sus hojas, ramas y tallos. No obstante, la especie que mostró menor intercepción de agua de lluvia, de acuerdo a los modelos de cuadrados mínimos, fue *P. pallens*.

En el Cuadro 6 se presentan los coeficientes del modelo de intercepción para las cuatro especies estudiadas.

Cuadro 6 Coeficientes de cuadrados mínimos que estiman la intercepción en cada especie estudiada como una función de la precipitación incidente (n=52).

Especie	Coeficientes de regresión			
	R ²	β_0	β_1	Sx
<i>A. rigidula</i>	0.7977	0.3304	0.1539	1.2853
<i>A. berlandieri</i>	0.5614	0.0678	0.0695	1.0444
<i>P. ebano</i>	0.6530	0.4000	0.0940	1.1330
<i>P. pallens</i>	0.4441	0.0437	0.0552	1.0142

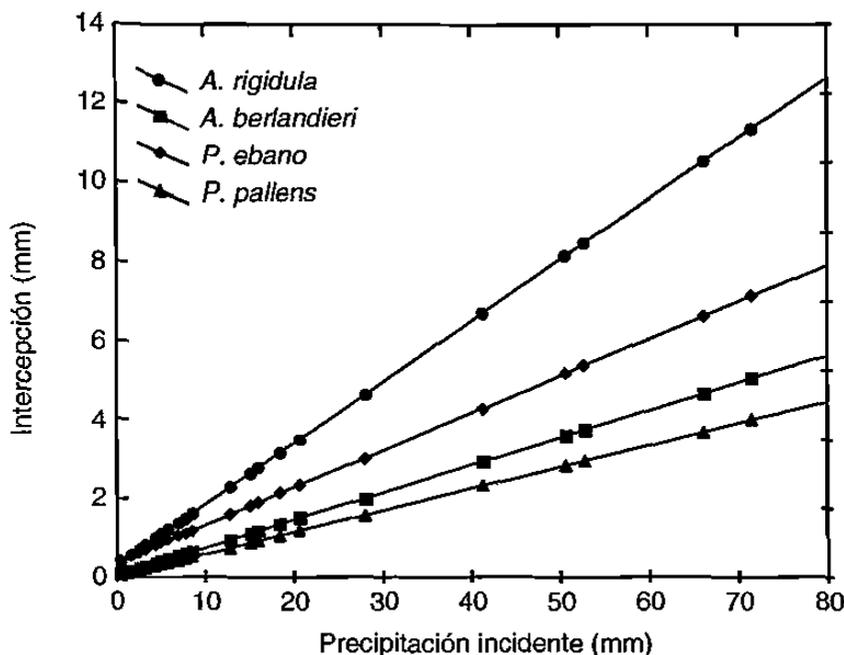


Figura 9 Ajuste de los modelos de intercepción de las cuatro especies.

En base a los resultados descritos, es necesario señalar las siguientes consideraciones con respecto a las especies *A. rigidula* y *P. ebano*. En este estudio se observó que la especie *A. rigidula* presentó la mayor intercepción, sin embargo es importante mencionar que la altura y cobertura de esta especie (2.50 ± 0.70 m y 4.21 ± 0.96 m², respectivamente) fue menor que *P. ebano* (3.01 ± 0.46 y 3.18 ± 0.60 m², respectivamente) por lo que la mayor intercepción observada podría deberse a la colocación inadecuada de los colectores en *A. rigidula*, ya que la morfología de éstos árboles no permitió la ubicación correcta del material para llevar a cabo la colección de lluvia bajo el dosel del árbol. Así mismo, la variabilidad en intercepción puede estar en relación a la distribución de los tallos, índice de área foliar y distribución del follaje dentro de las coronas (Loustau et al., 1992).

Sin embargo, la intercepción del agua de lluvia en plantaciones establecidas a diferentes densidades puede ser variar como lo demostró (Negi et al., 1993), encontrando que en espaciamentos mayores en rodales de *P. caribaea* la intercepción fue mayor con respecto a espaciamentos menores.