

Esta circunstancia se explica por lo que hemos dicho de las diversas corrientes subterráneas, que á semejanza de las superficiales tienen sus caminos determinados para circular.

Mencionadas estas aplicaciones de los casos citados, seguirémos examinando los que faltan por considerar.

Los thalwegs exterior y subterráneo pueden no ser paralelos.

Desviacion artificial del thalweg superior para perforar en su curso.

Casos en que no se puede perforar el terreno en los puntos indicados.

Acueducto de Guadalajara.

En los terrenos planos que tienen una corriente exterior, sea temporal ó permanente, el curso que ésta sigue es por lo regular mucho más sinuoso que el thalweg invisible, á causa de los escombros y otros accidentes que pueden perturbar al primero. Esta consideracion debe tenerse en cuenta al escoger el punto donde convenga practicar una perforacion, pues no siempre podrá situarse exactamente sobre el thalweg superior. En el caso de que el punto que se juzga más conveniente esté sobre este thalweg, hay necesidad de dar artificialmente otro curso á la corriente exterior para que no atierre la perforacion.

Cuando el curso del thalweg exterior ó los otros puntos indicados como más convenientes para las perforaciones, no estuvieren en la propiedad del que quiere utilizar el agua subterránea, ó que dichos puntos se hallen muy lejanos de la habitacion ó del lugar donde se necesita el agua, las perforaciones deben practicarse sobre los thalwegs secundarios, conformándose hasta donde sea posible, á las otras reglas establecidas sobre confluencias, pié de las pendientes, etc. Si el thalweg secundario se ha borrado de la superficie del terreno, se tomarán por direccion, el punto donde se pierde al encontrar la cañada al terreno plano, y el punto de confluencia con la corriente principal señalado por las inflexiones de que se ha hecho mérito.

Como un caso muy notable del aprovechamiento de las aguas subterráneas, buscadas en un lugar conveniente, citarémos los acueductos que surten de agua á la ciudad de Guadalajara.

Para surtir de agua á la ciudad, mandó practicar Fr. Pedro Buceta varias series de pozos comunicados por galerías, y que convergiesen todos á un centro comun que sirvió de receptáculo; de este punto se desprende el acueducto que lleva una agua excelente y en regular cantidad á Guadalajara.

Los pozos se hicieron en unas lomas lejanas que se hallan al

Occidente de la ciudad, y por donde pasan los corrientes subterráneas que vienen de los cerros del Colli, el Huiluste, Ocotan, y otros; las pendientes y cañadas de estos cerros tropiezan en la formacion aluvial que ocupa el valle de Guadalajara. Esta obra se emprendió en el año de 1731.

En todo lo anterior nos hemos referido á las corrientes subterráneas que circulan por los valles y cañadas, y nos faltan algunas consideraciones relativas á las que existen en las montañas.

Se comprende desde luego que la forma de una montaña, y sobre todo, la de su cúspide, puede influir notablemente para que existan corrientes subterráneas ó manantiales en su parte superior ó en sus flancos.

Si la cúspide tiene una forma afilada ó aguda, no podrá existir en ella alguna fuente, y si en algunos casos se encuentran depósitos de agua en ellas, son debidos á las aguas pluviales que pueden estancarse en las oquedades ó depresiones de las rocas impermeables.

Para que exista una fuente en la parte superior de una montaña, es necesario que el punto superior donde aparece esté dominado por una masa de terreno absorbente que la alimente, y al encontrarse un punto con esas condiciones sin que esté la fuente á descubierto, habrá probabilidades de encontrar las aguas subterráneas, buscando además las otras circunstancias que hemos estudiado al hablar de los puntos donde deben buscarse las corrientes interiores.

Uno de los casos más favorables para que exista una fuente sobre una montaña, es que ésta termine en una mesa suavemente inclinada, y que esté constituida de terreno permeable, reposando sobre una capa impermeable: en este caso es muy frecuente que exista una fuente en la parte média de la mesa ó en su parte más baja. Siendo más frecuentes y prolongadas las lluvias en esas alturas, producen manantiales á veces muy ricos, aun cuando el terreno absorbente sea de poco espesor; esto se entiende cuando la mesa tiene una anchura conveniente, pues si es angosta, no pueden formarse en ella los almacenes que produzcan la corriente.

Fuentes en las montañas.

Fuentes en la parte superior de una montaña.

Circunstancias favorables para que exista una fuente en la parte superior de la montaña.

Caso de montañas aisladas.

En el caso de montañas cónicas ó de colinas aisladas debe atenderse al diámetro de su base, para calcular si podrán tener manantiales: si los diámetros no pasan de 400 á 500 metros sólo producirán corrientes pobres, ó carecerán de ellas; sobre todo, si los planos de estratificación se inclinan á uno y otro lado del eje de la montaña; pero si la estratificación lleva las aguas todas de un mismo lado, será más favorable para producir corrientes abundantes.

Fuentes en los flancos de las montañas.

Vamos ahora á considerar las fuentes que existen en los flancos de las montañas.

Consideraciones estratigráficas.

Al entrar en este estudio deben considerarse primeramente las inclinaciones de los planos de estratificación ó de división. Así, cuando una montaña está terminada por una mesa, y que se halle situada entre dos cañadas ó valles, la mesa se inclina regularmente más á un lado que al otro, y los planos de estratificación, si existen, son paralelos á la superficie de la mesa. Si existiere una cresta de división de las aguas, sobre la mesa, puede estar hácia su medio ó aproximada á uno de los extremos: en el primer caso las inclinaciones son semejantes y llevan cantidades iguales de agua á cada valle; en el segundo, el lado subyacente es el más rápido y frecuentemente escarpado. En este caso sucede muchas veces que las cabezas de los estratus forman graderías y pueden estar á descubierto ó tapadas con el terreno detrítico. Las aguas pluviales que recibe la mesa siguen la pendiente más suave y van á dar al valle más lejano de la cresta. Se ve por estas consideraciones, que no deben buscarse las aguas ó fuentes del lado más rápido, que es del todo estéril ó sólo da corrientes muy pobres.

Reglas de las formas análogas.

Al asentar Paramelle estas reglas que hemos copiado textualmente, añade las siguientes observaciones sobre las formas análogas de las montañas: "*Cada cima de una cresta de montaña es el punto de partida de dos ramales que toman direcciones opuestas, y cada cuello es el punto de partida de dos valles opuestos.*"

Apoyado Paramelle en esta regla, describía los accidentes de las montañas, encontrándose al frente de una de sus pendientes, y daba á conocer con notable exactitud la posición de los con-

trafuertes y cañadas del lado opuesto, y anunciaba también si existirían manantiales y cuál debía ser su situación.

Quando se encuentra una montaña constituida por dos formaciones diferentes, una inferior, impermeable, como arcilla, y una superior que forme su mesa y que sea permeable, como de caliza ú otra roca, es muy común encontrar manantiales en el punto de separación de ambas formaciones, que por lo regular es una cornisa. Algunas de esas fuentes son visibles, y otras se hallan ocultas y pueden explotarse con facilidad. Si la mesa que termina la montaña tuviere algunos repliegues en su superficie éstos, podrán servir de guía para determinar los puntos donde se deban practicar las excavaciones.

Si se sigue una pendiente para buscar los puntos más favorables para practicar las excavaciones, los thalwegs ó arrugas superficiales pueden indicarlos, y en el caso de una pendiente unida, es indiferente tomar un punto ú otro, aunque es siempre conveniente alejarse lo más que se pueda de la cresta de la montaña: á veces conviene hacer un corte ó ceja para descubrir á la vez varios hilos de agua.

Un costado ó contrafuerte arredondado y angosto en toda su longitud es desfavorable para encontrar corrientes en su masa; pero si fuere suficientemente ancho, de más de quinientos metros, en este caso puede tener manantiales ó corrientes interiores bastante voluminosas. Para practicar una perforación en uno de esos contrafuertes, debe verse si tienen alguna depresión en su parte central ó hácia los lados, y en ese lugar debe buscarse el agua: si el thalweg tiene hácia arriba una pendiente más rápida que abajo, la excavación se practicará al pié de la pendiente más fuerte. Si el thalweg que parte de una cornisa se borra antes de llegar á la base, esto debe indicar que la corriente subterránea se profundiza, y en tal caso debe hacerse la excavación al pié de la cornisa.

Paramelle señala como un punto muy favorable para encontrar el agua en un costado ó contrafuerte, el lugar en que se inicia un thalweg sobre la pendiente, porque muchas ocasiones se encuentra un manantial en el origen de esos surcos y si-

Caso de dos formaciones diferentes en una montaña.

Aguas subterráneas en las pendientes.

Contrafuertes arredondados.

Cornisas de las montañas.

Puntos favorables en los contrafuertes.

que corriendo por el thalweg, y recomienda que se busquen las corrientes subterráneas en tales puntos.

Consideraciones sobre la línea de contorno.

Por lo dicho anteriormente y al concluir el exámen de las pendientes, debe establecerse que los puntos más favorables para encontrar las aguas subterráneas están en el contorno ó encuentro de las pendientes con los terrenos planos, y deben practicarse las excavaciones en los ángulos entrantes, y más especialmente en los puntos de encuentro del thalweg con esa línea de contorno. Cuando la pendiente de la montaña es de roca maciza, no se debe practicar la excavacion inmediatamente sobre la línea de contorno, sino más retirada para no tropezar luego con aquella roca.

No debe olvidarse en todo lo que se ha dicho al hablar de las fuentes y aguas subterráneas en las montañas, que debe tenerse en cuenta, y como un dato muy importante, la naturaleza de las rocas para saber si son permeables ó impermeables, y en qué relaciones se encuentran sobrepuestas.

Errores de óptica que deben evitarse.

Tambien debe tenerse mucho cuidado de evitar los errores de óptica al buscar los thalwegs y puntos más deprimidos en los valles y llanuras, porque cuando son de grande extension, le parecerá al observador que en cada punto en que se sitúa es el más bajo del terreno. Para determinar el curso del verdadero thalweg, deben observarse las huellas que dejan las aguas corrientes superficiales, y en caso de duda, hay necesidad de ir hasta el origen del thalweg é ir siguiendo su curso, poniendo jalones ó estacas á distancias convenientes para poder seguir su camino, con exactitud, desde léjos.

Ejemplos que confirman las reglas anteriores.

Ántes de pasar á otro asunto, conviene citar algunos ejemplos en confirmacion de las reglas establecidas por el abad Paramelle, escogiendo aquellos hechos que puedan comprobarse por la observacion propia, refiriéndonos á localidades mexicanas.

Origen de los rios.

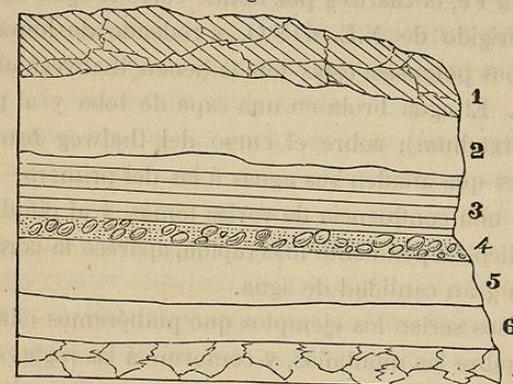
Desde luego, si se echa una ojeada sobre la carta oro-hidrográfica de la República, se verá cómo los rios tienen su origen en corrientes insignificantes acomodadas en los thalwegs de las cañadas; reunidos varios de esos hilos de agua, forman una co-

riente que sigue su curso por el thalweg del valle principal, y así sucesivamente.

Como ejemplo de una sucesion de capas permeables é impermeables en que el agua circula por las primeras, citarémos el terreno donde existe el manantial en la hacienda de Pozo del Cármen, en el Estado de San Luis Potosí. Existe allí una cañada donde puede verse perfectamente el órden de las capas, y es el siguiente:

Ejemplo de capas permeables é impermeables.

Fig. 41ª



Corte geológico de la cañada de Pozo del Cármen, en el Estado de San Luis Potosí.

EXPLICACION.

1. Basalto compacto.
2. Marga arcillosa.
3. Bancos paralelos de toba caliza.
4. Capa acuífera, formada de arena y fragmentos esquinados, de basalto.
5. Marga compacta.
6. Arcilla amarillenta, conteniendo restos fósiles de elefante.
7. Arcilla.

El agua brota de la capa número 4, que es la más permeable, y la formacion de este manantial se explica fácilmente. El basalto tiene numerosas grietas por donde escurren las aguas pluviales; descenden éstas con notable lentitud á través de las capas de marga y toba caliza, y al llegar á la capa arenosa circu-

lan con facilidad hasta encontrar salida, pues las capas inferiores son impermeables y no permiten que el agua siga descendiendo.

Ojos de agua
en el Valle de
México.

Como ejemplo de un manantial que se forma donde comienza á dibujarse el thalweg principal, y adonde concurren los thalwegs de varias lomas, tenemos los ojos de agua de Santa Fe y de Peña Pobre en el Valle de México; ambos muy notables por la regular cantidad de agua que producen.

En Santa Fe, el thalweg por donde corre el agua del manantial está dirigido de N.E. á S.O., y rodeado de lomas formadas de tobas pomosas: estas lomas tienen thalwegs angostos y profundos. El agua brota en una capa de toba y al pié de un sabino (*Taxodium*); sobre el curso del thalweg brotan otros manantiales que añaden sus aguas á las del primero. En Peña Pobre hay una confluencia de varias lomas, y al pié de una de ellas, que tiene la pendiente más rápida, aparece la corriente llevando una gran cantidad de agua.

Ejemplo de
manantiales
sobre las mon-
tañas.

Numerosos serian los ejemplos que pudiéramos citar de manantiales sobre las montañas, y conforme á las reglas establecidas anteriormente; pero sólo nos referiremos al ojo de agua del Sarro, en la Sierra del Doctor, Estado de Querétaro, que confirma una de aquellas reglas con mucha claridad. Sobre una montaña de caliza cretácea existe un gran peñon acantilado; al pié del peñon, donde el thalweg se dibuja y la pendiente se hace más suave, aparece un manantial muy rico que produce gran cantidad de agua en todo el curso del año.

Muchos serian tambien los ejemplos que pudieran referirse de manantiales en la línea de contorno, es decir, donde las tierras de los valles tocan á las pendientes de las montañas; pero este caso se repite con tal frecuencia, que no hay necesidad de citar sus ejemplos.

Se recomienda
observar sobre
el terreno las
circunstancias
referidas sobre
hidrografía
subterránea.

Después de haber referido todas las reglas acerca de la hidrografía subterránea, así como algunos de los casos que las han comprobado, es claro que para ejercitarse y mejor hacer la aplicación de dichas reglas, es conveniente que el hidróscopo visite muchos lugares donde se hayan practicado pozos ó don-

de existan manantiales, y examine las circunstancias orográficas y geológicas de los terrenos donde esas corrientes existan. En ese exámen se observarán: el volúmen de agua que produce la fuente, las capas permeables que están sobre ella, y la impermeable sobre la cual resbala, teniendo en cuenta su naturaleza é inclinación; estudiará con el mayor cuidado los thalwegs, tanto principales como secundarios, y observará si tienen manantiales á descubierto, si existen sobre ellos ó en sus cercanías algunas de las plantas indicadoras de las corrientes de agua, etc., etc. El estudio de la teoría y las observaciones prácticas hacen que los observadores puedan resolver con el mayor acierto esas cuestiones de hidrografía subterránea.

En resúmen, las reglas establecidas por Paramelle para buscar los lugares propicios donde deben encontrarse las aguas subterráneas, son: en el thalweg de un valle; en la línea de contorno; en un contrafuerte, en su cornisa ó sobre la meseta. El mismo observador establece algunas reglas para determinar con la mayor aproximación posible las profundidades á que deben encontrarse las aguas; de esas reglas extractamos lo siguiente:

Determinacion
de la profun-
didad á que se
encuentra el
agua subte-
rránea.

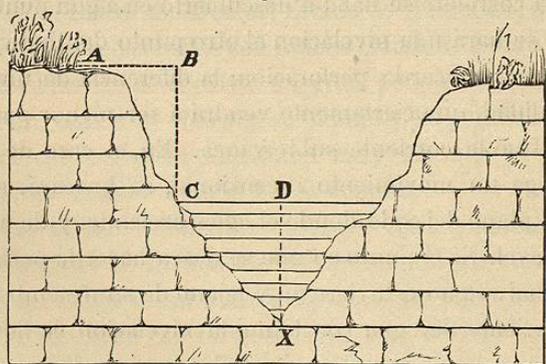
Primer caso: perforación sobre un thalweg. Se observará primero si la corriente se halla á descubierto en algun punto, y de esta base se hará una nivelación al otro punto del thalweg donde se proyecta hacer la perforación; la diferencia de nivel dará la profundidad, que ciertamente vendrá á ser menor por el declive que trae la corriente subterránea. En el caso de que la fuente tenga un movimiento ascensional, se buscará, si fuere posible, el plano del codo donde el agua asciende, y de allí contar el desnivel. Si el punto en que se desea hacer la perforación sobre el thalweg no estuviere muy lejano de su desembocadura á una corriente de agua constante, la nivelación se llevará de esta última ó de otro punto más arriba en caso de que el agua apareciere á la superficie sobre el thalweg.

Caso de los va-
lles.

Segundo caso: Perforación en un punto lejano á la fuente descubierta ó en un lugar de gran desnivel respecto de ella. Para determinar la profundidad en este caso, dice el abad Paramelle: "El fondo de casi todos los valles está lleno de terreno de

acarreo, excepto en las estrangulaciones; y habiéndome persuadido por millares de experiencias, que en la línea de intersección de las dos pendientes del valle está la mayor profundidad en que el agua se encuentra bajo los escombros del terreno, se determinará por los medios indicados el punto del thalweg en que se debe practicar la perforación, y se pone allí una estaca ó jalon; se mide la distancia que existe entre la estaca y uno de los costados del valle; se nivela este costado para conocer su altura y la distancia horizontal que hay entre su cornisa y una línea vertical que se levanta del pié del costado. Esta altura y esta distancia se componen de las alturas y las distancias parciales que se han encontrado en las estaciones de la nivelación. Terminada la operación, se establece la siguiente proporción: la distancia que hay entre la cornisa y la línea vertical que parte del pié del costado, es á la altura del costado, como la distancia horizontal que hay entre el pié del costado y el punto en que se va á perforar, es á la profundidad de la fuente." Para mayor claridad de este asunto inserta Paramelle la siguiente figura:

Fig. 42ª



Corte de un valle cuyo fondo está lleno de terreno de acarreo.

De los triángulos A B C y C D X, se deduce la proporción: $AB : BC :: CD : DX$; de donde

$$DX = \frac{BC \times CD}{AB}.$$

Conocida la inclinación de la pendiente, y por procedimientos análogos á los anteriores, se puede calcular á qué profundidad se encontrará la pendiente de la montaña ó del costado según el punto que se fije para la perforación. Se comprende que en el caso de una pendiente uniforme no hay necesidad de hacer la nivelación desde la cornisa, sino de un punto cualquiera de dicha pendiente, pues las relaciones geométricas serían las mismas.

Recomienda Paramelle que en el caso de encontrar algún valle que presente estrangulaciones y ensanchamientos, sobre estos últimos sea donde se apliquen los cálculos y determinaciones anteriores.

El caso de que la corriente subterránea no se encuentre en la línea de intersección de que se ha hablado, se verifica cuando las capas de los dos costados están muy inclinadas, y puede acontecer que estando separadas las dos estratificaciones, dejen entre sí una grieta vertical que no puede conservar la corriente en la unión de sus superficies. Este caso, que por lo regular hace que la corriente se encuentre á mayor profundidad que la esperada, lo considera Paramelle como excepcional.

Si la corriente se encontrare en la base de un terreno escarpado, la nivelación se practicará sobre el lado opuesto.

El autor referido recomienda estos sistemas de investigación, no solamente al caso de la corriente que sigue el thalweg subterráneo, sino á todos los que circulan en el mismo plano ó en las líneas de contorno, fundando esta generalidad de hechos en que las aguas subterráneas, lo mismo que las superficiales, al llegar á las corrientes principales en que desembocan, tienen el mismo nivel que éstas.

Tercer caso: corrientes en las montañas. Para resolver lo relativo á este caso es necesario fijarse de preferencia en la naturaleza de las capas que forman las montañas para ver si son permeables ó impermeables, así como en el sentido de su inclinación, respecto de la pendiente general donde se propone practicar la perforación. Atendiendo á esto último debe observarse que si la inclinación de las capas fuese contraria á la de las pen-

Corrientes en las montañas.

dientes, el agua resbalaría hácia el centro de la montaña, y entónces no debería buscarse sobre esta pendiente que se considera. Si las estratificaciones son paralelas ó concordantes con la pendiente de la montaña, se buscará una capa impermeable para tomarla como base de la nivelacion hácia el punto elegido para perforar, porque la capa impermeable será la que sostenga al agua filtrada á través de las impermeables.

La misma regla recomienda Paramelle en el caso de una perforacion sobre una meseta. Despues de haber marcado el punto en que debe hacerse la excavacion, se sigue el thalweg hasta el pié de la cornisa ó pendiente rápida de la mesa, y la nivelacion se comienza sobre la capa impermeable más alta, procediendo en seguida como en el caso anterior.

El autor concluye esta parte de su obra recomendando que se observen los pozos que ya estén abiertos en los terrenos planos para guiarse en la investigacion sobre la profundidad á que se encontrará el agua, y esta regla será aun más cierta en el caso de los terrenos aluviales, que permiten á las corrientes extenderse en grandes mantos, como si fuesen lagos interiores.

Estas reglas, dice Paramelle, para conocer la profundidad de las fuentes, son las únicas que treinta años de estudios y experiencias me han hecho descubrir. Si no pueden servir para determinar en todos los casos esa profundidad de una manera rigurosamente exacta, á lo ménos resuelven, casi siempre, la cuestion importante, que es de saber el *máximum* de profundidad que puede tener una fuente en el lugar en que se va á ejecutar la perforacion, y por consecuencia el *máximum* de gastos que se tienen que hacer para alcanzarla. El que quiera llevarla hasta delante de su casa, puede saber tambien, por una simple nivelacion, si estará bastante alta para llegar al lugar deseado.

Concluye el autor haciendo algunas observaciones sobre el modo de conocer aproximadamente el volúmen que tendrá una fuente que se propone abrir, dado el conocimiento del terreno. Siendo tan variadas las circunstancias que en cada caso se presentan, no se podrá determinar regla alguna con exactitud: Paramelle ha deducido de la experiencia, que cuando una meseta

Determinacion aproximativa del volúmen que tendrá una fuente que se propone descubrir.

está recubierta de terreno detrítico de dos á ocho metros de profundidad y reposando sobre una capa impermeable, convenientemente inclinada, cada área de cinco hectaras produce en la estacion de secas una fuente de cerca de un centímetro de diámetro que da cuatro litros de agua por minuto.

Se comprende que la porosidad de los terrenos, la relacion de las capas impermeables con las permeables, la inclinacion del terreno, etc., contribuyen á hacer variar las reglas que pudieran establecerse, y lo más conveniente es calcular conforme al conjunto de reglas que se han dado sobre los casos favorables á la produccion de corrientes subterráneas ó á la formacion de manantiales.

Falta ahora hacer algunas observaciones sobre los terrenos favorables ó desfavorables á la existencia de manantiales ó de corrientes subterráneas. Mucho se ha indicado ya sobre este particular en las páginas anteriores; pero conviene hacer aquí un resumen de ese asunto.

Desde luego no hay que olvidar lo ya manifestado acerca de las formas de las montañas y valles, sobre las inclinaciones de sus capas ó masas de rocas, pues estas circunstancias influyen muy notablemente en la cuestion de que se trata.

Hay montañas y mesetas formadas de rocas compactas sin estratificacion, como las masas de pórfido de basalto, de granito y otras; pero si existen en dichas masas los planos de separacion que las dividen en bloks y cuartones, las aguas pueden filtrarse por esas hendeduras. Debe atenderse, en el caso de encontrar esas rocas, á sus espesores, porque en algunos casos sólo formarán capas de poca importancia, como se dijo de los basaltos de Pozo del Carmen, y en otros constituirán montañas enteras. En este caso las aguas ó corrientes subterráneas que circulan en las montañas son de poco volúmen en lo general, y la dureza del terreno hace que sean costosas las excavaciones.

Los basaltos, en México, forman en muchas partes depósitos de poco espesor colocados sobre las margas, tobas y otras rocas sedimentarias, en cuyo caso se pueden buscar las corrientes subterráneas y aun los manantiales, como sucede en el que ci-

Terreno favorable ó desfavorable para la existencia de corrientes subterráneas.

Pórfidos, basaltos, granito.