## CIRCULACION SUBTERRANEA DEL AGUA POR DIACLASAS, O CAVIDADES SUPERCAPILARES,

por el Ingeniero de minas Juan D. Villarello.

El agua circula en el subsuelo por fracturas, grietas ó intersticios, y en general por espacios vacíos existentes en el interior de las rocas permeables. Estos espacios vacíos por los cuales el agua puede circular, son capitares ó supercapitares, verificándose la circulación en el primer caso de acuerdo con las leyes de la capitaridad, y en el segundo conforme á las leyes de la hidrostática.

En las rocas macizas, coherentes, y por lo mismo poco porosas, el agua no puede circular sino por las grietas, fracturas ó cavidades de esas rocas, y por lo tanto, la permeabilidad de estas últimas no es continua, sino que está localizada en esas grietas, fracturas ó cavidades, y fuera de ellas, ó sea, en la masa de la roca, el agua no puede circular. En la presente Memoria, voy á ocuparme en describir la circulación del agua en el interior de estas rocas macizas agrietadas, ó que contienen grandes cavidades, porque esa circulación es de grandísima importancia industrial en casi todo el país.

La circulación subterránea de las aguas se ha estudiado de preferencia en rocas de permeabilidad continua, es decir, en rocas muy porosas ó en materiales incoherentes; pero en países montañosos como es México, y en donde el terreno en casi todas esas elevaciones está constituido por rocas coherentes, muy poco porosas y relativamente muy fracturadas, el estudio de la circulación del agua por diaclasas es de mucha importancia industrial.

En México, el relieve muy accidentado del suelo permite á las aguas meteóricas su rápido descenso superficial hacia las planicies más bajas, en las cuales el exceso de agua superficial hace muchas veces innecesario el uso de las aguas que circulan en el subsuelo. En cambio, en las alturas el estudio de la circulación subterránea del agua, y la captación de esta última, son problemas que cada día se presentan en mayor número, no sólo por lo que á las necesidades domésticas se refiere, sino también por necesidades de la agricultura,

industria que al desarrollarse en México sobre una base científica, tendrá que ser protectora decidida de la hidrología subterránea.

Sin estudios detallados, sin reconocimientos geológicos detenidos, se han trazado y perforado multitud de pozos en muchas regiones del país, esperando, sin fundamento científico alguno, que por esas perforaciones brotara en gran cantidad el agua subterránea. El resultado de la mayor parte de esas perforaciones, muchas de ellas bastante profundas, ha sido el más completo fracaso, y por consiguiente la pérdida de cuantiosos capitales. La imitación sin criterio científico, la imitación de lo que se ha hecho en otros países, sin tener en cuenta las notables diferencias geológicas entre el uno y los otros, es la explicación de esos fracasos, y ha sido la causa de la pérdida de esos capitales.

México, hablando en términos generales, no es país en el cual alcanzarán éxito notable los pozos brotantes permanentes, pero en cambio México será el país de los socavones de drenaje. El agua subterránea en este país, sobre todo en los lugares de relieve poco accidentado, exceptuando solamente las partes más bajas de algunas cuencas y valles, no tiene presión hidrostática suficiente para brotar por perforaciones verticales, pero sí puede salir al exterior por conductos horizontales. Estos últimos, por oponer menor resistencia al movimiento del agua, hacen que salga por ellos este líquido, en vez de continuar infiltrándose por las grietas ó cavidades irregulares, que constituyen los trayectos más comunes del líquido mencionado.

Siendo por lo general más frecuente en México, que el agua subterránea circule por grietas, fracturas ó cavidades supercapilares, contenidas en las rocas igneas ó sedimentárias que constituyen la mayor parte del país, y siendo á la vez casi imposible localizar desde la superficie del terreno el lugar preciso en que se encuentran en el subsuelo esas cavidades, ó las partes más amplias de las grietas ó fracturas que cortan á las rocas, se comprende sin esfuerzo por qué son tan numerosos los fracasos de los pozos artesianos perforados en las rocas igneas y sedimentarias de México. En otros países algunas de las rocas sedimentarias son muy porosas, y por lo tanto de permeabilidad continua; pero en México, la mayor parte de estas rocas, calizas, pizarras y areniscas, jurásico-cretácicas y también terciarias, son por lo general de estructura compacta, y en su interior el agua sólo puede circular por las grietas, fracturas, planos de estratificación ó cavidades, contenidas en todas esas rocas, las cuales no son de permeabilidad continua, sino por el contrario muy localizada.

No es ya la varita de madera en equilibrio, ni la vara milagrosa ó adivinadora, las guías que conducen al descubrimiento de las corrientes de agua subterránea; no son ya las plantas que crecen en determinados lugares los indicios ciertos para suponer la existencia de aguas profundas; no bastan las reglas del abad Paramelle para investigar las corrientes de agua subterránea en toda clase de terrenos; la generalización de teorías hidrológicas no debe ser ya la norma de estos estudios é investigaciones; y por último no será ya bastante el conocimiento de la topografía é hidrografía de un lugar para conocer el modo de circulación de las aguas en las profundidades del mismo lugar. En cambio, el estudio geológico de la región, el conocimiento de su tectónica, de la estructura y relaciones generales de las capas estratificadas, así como de la naturaleza, composición, plegamientos y agrietamientos de las rocas, permiten concluir con fundamento, y de una manera racional y científica, cuál es el modo de circulación subterránea de las aguas en cada caso particular, y para cada una de las regiones estudiadas.

El principio de la diferenciación y distinción de los casos, basada sobre el elemento esencial de los datos geológicos, constituye el fundamento de la hidrología subterránea, rama muy interesante de la geología aplicada, y la cual estudia el conjunto de fenómenos que constituyen el ciclo completo de la circulación del agua en el subsuelo. Por esto es que los estudios de hidrología subterránea que están llevando á feliz término los geólogos mexicanos, (1) son un contingente importantísimo para el conocimiento de la hidrología del país, y serán también esos estudios de gran utilidad para la industria del porvenir en México, para la agricultura, cuando ésta, en un futuro no muy lejano, se desarrolle sobre base científica que la haga progresar rápida y notablemente.

Explicada ya la importancia que tienen en México los estudios de la circulación subterránea del agua en rocas coherentes agrietadas, pretenderé detallar tan interesante circulación en los párrafos siguientes.

Los receptáculos acuíferos subterráneos contenidos en rocas compactas agrietadas, están constituidos por cavidades más ó menos grandes, ó por grietas y fracturas más ó menos localizadas. Estos receptáculos los divido, por su forma aparente, en los siguientes ti-

<sup>(1)</sup> Véanse los Parergones del Instituto Geológico Nacional, y los Boletines de la Sociedad Geológica Mexicana.

pos. "Cavernas ó embudos," son cavidades de mayor ó menor importancia, muy frecuentes en las calizas, y debidas en parte á derrumbes ó hundimientos, y en parte también á la disolución de la caliza en las aguas meteóricas que contienen anhidrido carbónico. "Venas," son tubos localizados, de sección muy irregular y variable, que se hallan con frecuencia en las calizas, y también en algunas corrientes de lava, en los lugares por donde esta lava escurrió muy fluída, se solidificó después en la superficie continuando el escurrimiento en el interior de la corriente, hasta que más tarde, al terminar esa circulación interior de lava fluída, quedó vacío el trayecto tubular que siguiera en su movimiento descendente. "Paraclasas" y "Diaclasas," son fracturas por lo general supercapilares que cortan á las rocas en varias direcciones, y de las cuales, las primeras están acompañadas de resbalamientos del terreno más ó menos notables, fallas que á veces son de dimensiones horizontales bastante considerables. "Planos de estratificación," son los que separan las caras de los estratos superpuestos, en las cuales existen espacios vacíos irregulares comunicados entre sí, y que permiten, por lo tanto, la circulación del agua en el subsuelo. Por último, las grietas ó: "Leptoclasas," son pequeñas fracturas que cortan á las rocas en todas direcciones, sobre todo en las cercanías de la superficie del suelo, y que son debidas por lo general á contracciones de la roca, esfuerzos de tensión producidos al secarse las rocas sedimentarias, ó al enfriarse las que son de origen ígneo.

Las "cavernas," "embudos," "venas," y en general las cavidades grandes contenidas en las calizas, se encuentran en las diaelasas ó paraclasas que cortan á estas rocas, y de preferencia en los lugares en que estas fracturas están cortadas por grietas transversales. En efecto, en estas zonas la circulación del agua es más activa, porque los cruzamientos mencionados constituyen trayectos supercapilares, los cuales son preferidos por los líquidos en su circulación descendente; y como el agua meteórica que baja por estos trayectos contiene anhidrido carbónico, á medida que la circulación sea más activa, será mayor la cantidad de este anhidrido que pase por el mismo lugar, y por lo tanto será más considerable la cantidad de caliza disuelta, y más grandes serán cada vez las cavidades que vayan quedando vacías en esos trayectos de circulación activa del agua subterránea.

Las intersecciones de la superficie del suelo con las partes superiores de las grietas, fracturas ó cavidades, antes mencionadas, es decir, los afloramientos de todas éstas, constituyen la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos de que me ocupo en este estudio. Solamente por esos afloramientos puede penetrar al interior de la roca coherente el agua meteórica que directamente cae en ellos, ó la que por allí pasa descendiendo en la superficie del terreno; y por lo mismo, no puede considerarse como superficie de alimentación de estos receptáculos á toda la superficie del suelo ocupada por las rocas que contienen á esas grietas, fracturas ó cavidades. Sin embargo, como indicaré en alguno de los párrafos subsecuentes, puede aumentarse por un procedimiento artificial la superficie de alimentación de estos receptáculos acuíferos subterráneos, hasta llegar á hacerla casi igual á la extensión que en la superficie del terreno ocupen las rocas que los contienen.

Infiltrada el agua meteórica en la superficie de alimentación ya mencionada, comienza la circulación subterránea de este líquido, hasta que en gran parte vuelve de nuevo al exterior saliendo por los manantiales. Esta circulación subterránea tiene lugar de preferencia por las partes más amplias de las fracturas ó cavidades, y por lo tanto se forman en el subsuelo sistemas de venas acuíferas. En efecto, las cavidades, así como las fracturas de las rocas, no son de igual amplitud en todas sus partes, sino que en unos lugares se ensanchan, en otros se estrechan, y estas variaciones ocasionan cambios notables en la velocidad de los líquidos que circulan en ellas, velocidad que es mayor en las partes supercapilares que en las capilares, y casi nula en las subcapilares, por ser estas últimas las que oponen mayor resistencia al movimiento de los líquidos. Según esto, si el agua en su trayecto subterráneo puede descender con mucha más velocidad por las partes amplias de las fracturas y cavidades, por estos lugares se verificará de preferencia el descenso y la circulación de las aguas meteóricas. Estos trayectos amplios, estos espacios irregularmente tubulares y ramaleados, forman dentro de las fracturas una especie de red de venas, por las cuales descienden de preferencia las aguas meteóricas infiltradas en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos. A la profundidad, las fracturas y cavidades se van estrechando y dasapareciendo, porque la rigidez de la roca va siendo menor, y por lo mismo su agrietamiento es más difícil; y aunque es cierto que varias diaclasas llegan á mucha profundidad, la mayor parte de las fracturas van desapareciendo á medida que se alejan de la superficie del terreno. Según esto, la circulación del agua en el interior de las rocas coherentes

agrietadas va siendo más lenta á la profundidad, porque su descenso se verifica por conductos cada vez más estrechos y limitados, es decir, que el sistema venoso acuífero que he mencionado, se redace mucho y se vueive capilar ó subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad. Esta parte profunda de los receptáculos acuíferos subcapilar cuando alcanza notable profundidad.

Descrita ya la forma general de estos sistemas de venas ecras que existen en las grietas, fracturas ó cavidades, de las recoherentes, me será ya bastante fácil explicar de qué manera circular de agua en el subsuelo constituido por las rocas mencionadas.

En las cercanías de la superficie del terreno el agua infiltrade encuentra muchas venas amplias, y desciende con relativa rapider en gran cantidad. Después, el descenso del agua continúa, pero en menor velocidad, hasta que llega á encontrar más abajo á la agua meteórica anteriormente infiltrada y que se halla casi en reposo. Esta zona en la cual el agua ya no puede descender sino con mucha lentitud, por las razones antes indicadas, desempeña el mismo paper de un fondo casi impermeable, es decir, impide que el agua infiltrada siga descendiendo con facilidad á mayores profundidades, y la obliga por lo tanto á acumularse de este nivel hacia arriba. Este nivel, por los motivos que indicaré en seguida, puede considerarse en mo el nivel inferior de los manantiales.

Al irse acumulando el agua en las cavidades tubulares por cuales desciende de la superficie del terreno, se va llenando el rectáculo acuífero subterráneo, el nivel del agua va subiendo en escatema venoso acuífero, y por lo tanto va aumentando en él la predictionado. Esta presión hace que el agua se infiltre lateralmente probable de la greca angostas, capilares, comunicadas con el sistema venoso mencionado, y de este modo se ensancha horizontalmente el receptáculo acuífero subterráneo, formándose sistemas venosos secundarios. En estos últimos, el movimiento del agua es debido principalmente á la presión hidrostática que existe en los sistemas venosos principales, y como esa presión varía al subir ó bajar en estade el nivel del agua, la velocidad con la cual circule este líquido en la sistemas venosos secundarios será variable en las diversas épocas

del año, llegando á su máximum en la temporada, ó poco después de la temporada de lluvias, que es cuando el agua alcanza nivel más alto en los sistemas venosos principales ya descritos. La parte de estos receptáculos acuíferos subterráneos comprendida entre la superficie del terreno y el nivel más alto que alcanza el agua en el subsuelo, es la región de alimentación, por la cual sólo baja agua en la época de lluvias; y desde ese nivel más alto que alcanza el agua hasta la profundidad en que este líquido está siempre casi en reposo, porque desciende con muchísima lentitud, es la región activa, es decir, la región que alimenta á los manantiales como se verá después. Según esto, el nivel superior de la región activa, es también el nivel superior al cual puede haber manantiales aunque sólo intermitentes; y el nivel inferior de la región activa, nivel en que comienza la zona de retención de las aguas subterráneas, es el nivel más bajo al cual puede haber manantiales, y por esto le liamo, como dije antes, nivel inferior de los manantiales.

En los sistemas venosos acuíferos secundarios que mencioné antes, sistemas alimentados por el agua contenida en la región activa de los sistemas venosos principales, el agua circula más bien horizontalmente que en descenso; pero en muchos casos asciende, debido esto á la presión hidrostática que varía con la altura que alcanza el agua en la región activa de los sistemas venosos principales.

Cuando la superficie del terreno corta á estos sistemas venosos, ya sea á los principales ó á los secundarios, en su región activa, el agua sale al exterior por esas intersecciones, que son orificios de desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos, orificios que conocemos con el nombre de manantiales. Por éstos sale otra vez el agua al exterior, desciende luego por la superficie del terreno, y á veces vuelve á infiltrarse en superficies de alimentación de receptáculos acuíferos subterráneos situados más abajo, y se repiten entonces los mismos fenómenos circulatorios ya descritos.

Como se ve, en estos sistemas venosos acuíferos, contenidos en las fracturas ó cavidades de las rocas, la primera parte del trayecto del agua es descendente, y después puede ser ascendente por sistemas venosos secundarios. En este caso, si el agua llega á descender á mucha profundidad se calienta, sube después caliente y sale por los manantiales como agua termal; y como en un sistema venoso complicado, unas venas pueden venir de abajo hacia arriba y otras ir de arriba para abajo, al ser cortadas á poca distancia unas de otras por la superficie del terreno, se encontrarán manantiales con agua

termal muy cerca de otros manantiales con agua fría, revelando los primeros la circulación profunda ascendente, y los segundos la superficial descendente, aunque todas esas aguas son de origen meteórico.

Como en las recas coherentes agrietadas muchas de las fracturas no están unidas entre sí, y como en el interior de cada una de
estas fracturas pueden existir sistemas venosos acuíferos como los
ya descritos, estos últimos serán independientes los unos de los citos;
y entonces se encontrarán manantiales muy cercanos entre sí, pero
de regímenes muy distintos, de gastos muy diferentes, y no estarán
en relación hidrostática unos con otros, como se observa en medias
localidades del país entre las cuales mencionaré: la hacienda de
lava, arriba de Contreras, en el Distrito Federal; y la Cañada de
Hércules, en el Estado de Querétaro.

Cuando los sistemas venosos acuíferos mencionados se encuentran en el interior de corrientes de lava, los manantiales se hallan en las extremidades ó bordes de estas corrientes, las cuales por la general límitan á las planicies inferiores. En efecto, siendo los mantiales las intersecciones entre la superficie del terreno y las venta acuíferas en su región activa, y estando estas venas contenidas las corrientes de lava, hacia la parte baja de estas corrientes, la sus bordes, tienen que encontrarse las referidas intersecciones ú officios de desagüe de esas venas acuíferas subterráneas. Este caso en muy frecuente en el país, y entre otros manantiales que he encontrado situados así, citaré los siguientes: los de las faldas del Ajunto, en el Distrito Federal; los de las cercanías de la Laguna de ma, en el Estado de México; los de Jintepec, en el Estado de Michoacán.

Se comprende por lo anterior, que en los sistemas venosos accideros subterráneos que he descrito, hay dos clases de circulación de agua: una muy importante, relativamente rápida y descendente; y otra mucho menos rápida, horizontal más bien que descendente, aunque á veces es en parte ascendente. La primera se verifica en los espacios supercapilares que existen en las fracturas y cavidades de las rocas, y constituyen lo que he llamado sistemas venosos principales; y la segunda tiene lugar por los espacios capilares que existen en fracturas ó grietas de menor importancia, y que forman los que he designado con el nombre de sistemas venosos acuíferos secundarios. Esta notable diferencia en la velocidad de circulación del agua por las diversas partes de su trayecto subterráneo, permite que en la tempo-

rada de lluvias se llene la región activa de los sistemas venosos principales, y que esta región no se vacíe desde luego, como sucedería si en la unidad de tiempo el agua pudiera salir por los manantiales, en igual cantidad á la que se infiltra en la superficie de alimentación en la misma unidad de tiempo. Siendo mucho menor la velocidad de circulación del agua en los sistemas venosos secundarios, este líquido se acumula en la región activa del sistema venoso principal, y de ésta va pasando poco á poco á las venas secundarias hasta llegar á los manantiales. Estos últimos, á medida que están á nivel más bajo, tendrán mayores probabilidades de ser permanentes, y en cambio serán temporales los que se encuentren más altos, aunque por lo general el gasto de todos será variable, porque en éste influye la presión hidrostática, que va disminuyendo á medida que desciende el nivel del agua en la región activa de las venas principales, al irse vaciando éstas durante la temporada de secas en cada año. Así, poco después de las lluvias, los manantiales llegarán á su gasto máximum, poco á poco este volumen de agua irá disminuyendo, algunos manantiales se secarán en la temporada de secas, y los que sean permanentes liegarán á su gasto mínimum en esta misma temporada del año.

Se comprende sin esfuerzo, en vista de lo-anterior, que la cantidad de agua que sale por los manantiales, es proporcional á la cantidad que se infiltra de este líquido en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por los mismos manantiales. Por lo tanto, para aumentar el volumen de agua que anualmente circula en el subsuelo, es indispensable procurar se infiltre mayor cantidad de agua en las superficies de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, es decir, es indispensable aumentar los coeficientes de infiltración de las rocas que afloran en esas superficies.

Como dije antes, en las rocas coherentes agrietadas el agua sólo puede infiltrarse por los afloramientos de estas grietas, fracturas ó cavidades; y según esto, cuando esas rocas están completamente descubiertas, sin ningún depósito de material incoherente encima, la infiltración anual es relativamente pequeña, sobre todo si la superficie del terreno está muy inclinada. En efecto, el agua corriente superficial baja con mucha velocidad en este caso, y sólo una cantidad pequeña se infiltra; pero como en las rocas macizas agrietadas son muy limitados los lugares por donde la infiltración puede tener lugar, la mayor parte del agua de lluvia alimenta más bien á las co-

rrientes superficiales y muy poca relativamente es el agua meteórica que llega entonces á los receptáculos acuíferos subterráneos. En cambio, cuando las rocas coherentes agrietadas están cubiertas en la superficie del terreno por materiales incoherentes, como son por ejemplo, el detritico que resulta de la alteración de la roca, ó las arenas y cenizas volcánicas, la infiltración del agua es entonces muy considerable. Está cubierta de material incoherente, retiene al agua que cae ó desciende en la superficie del terreno, y constituye una especie de esponja de la cual pasa el agua á la profundidad, por las grietas, fracturas ó cavidades, contenidas en las rocas macizas que están situadas debajo de ese material incoherente. La presencia de este último significa, según lo anterior, un aumento muy considerable en la superficie de alimentación de los receptáculos acuiferos subterráneos contenidos en las rocas coherentes, porque mediante él se puede infiltrar el agua en toda la superficie del terreno, y no únicamente en la pequeña porción de esta superficie ocupada por los afloramientos de las grietas, fracturas ó cavidades de las rocas coherentes. En cambio, cuando por efecto de la erosión desaparece el material incoherente, y quedan á descubierto las rocas macizas agrietadas, se pierde la parte más importante de la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, disminuye considerablemente la cantidad de agua que se infiltra y circula por las grietas de las rocas coherentes, y se secan los manantiales, ó su gasto se reduce mucho, tendiendo éstos á ser más bien de régimen temporal que permanente.

Dije en uno de los párrafos anteriores, que existe un procedimiento artificial para aumentar la extensión de las superficies que alimentan á receptáculos acuíferos subterráneos. Este procedimiento consiste en desarrollar la vegetación arbolada en las superficies de alimentación. En efecto, la vegetación forestal con sus despojos, ese revestimiento vivo y muerto, desempeña funciones tan interesantes como son entre otras las siguientes: forma una coraza vegetal, como se le ha llamado, que impide la erosión del suelo por las aguas corrientes superficiales; es una esponja que absorbe el agua con facilidad; sirve como pantalla que impide la evaporación rápida del agua absorbida; es un regulador de las corrientes de agua subterráneas y superficiales; constituye una defensa para las poblaciones cercanas, porque impide el régimen torrencial de los ríos; y por último, además de su benéfica influencia como agente climatológico é higiénico, que uniforma la temperatura y humedad del aire y purifica el

ambiente, garantiza la circulación voluminosa del agua en el subsuelo, y el gasto constante de los manantiales.

En los bosques se encuentra sobre el terreno una cubierta bastante gruesa por lo general, constituida en la parte superior por restos de vegetación, troncos, ramas, hojas caídas, y abajo hay gran cantidad de residuos vegetales en descomposición, ó sea, la materia negra conocida con el nombre de "humus." Esta materia absorbe agua en cantidad que varía entre 0.7 hasta 4 veces su peso, según es la clase de materia vegetal de la cual proviene, y según es también el período en que se encuentra la descomposición de esa materia. Según esto, por una parte, el humus es una especie de esponja que absorbe gran cantidad de agua; y por otra parte, los troncos y ramas caídas, así como las raíces de los árboles, son obstáculos innumerables que impiden la concentración instantánea de una gran masa de agua, que impiden los torrentes, y por lo tanto la erosión del material incoherente que cubre en los bosques á las rocas macizas del subsuelo. Es decir, que tanto este material, como el humus, absorben agua en toda la superficie del terreno, y de esta especie de esponja pasa después el líquido á las grietas ó cavidades contenidas en las rocas coherentes que se hallan debajo. Por lo mismo, la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, contenidos en rocas coherentes agrietadas. Ilega entonces á ser casiigual á la extensión de terreno que se apoya sobre las rocas referidas.

La influencia que los bosques ejercen sobre la distribución de las lluvias locales, es cuestión que hasta ahora no puede considerarse resuelta de una manera general, ni afirmativa ni negativamente; pero en cambio, es indudable que la cantidad de agua fisiológicamente transpirada en las comarcas boscosas, es mucho menor que la físicamente evaporada en los lugares desprovistos de vegetación; y este motivo, agregado á los indicados en el párrafo anterior, son fundamento bastante para asegurar, que el gasto de los manantiales es una función del revestimiento arbolado que exista en la superficie de terreno, en donde se infiltra el agua que alimenta á los receptáculos acuíferos subterráneos que desaguan por esos manantiales. En vista de esto, y para conservar y aumentar el gasto de todos los manantiales que están en relación directa con los receptáculos acuíferos subterráneos que han sido objeto de los párrafos anteriores, y que en el país son tan numerosos, es indispensable lo siguiente: que en México, las Autoridades competentes impartan una protección

eficaz á la coraza vegetal que debe cubrir á las superficies de alimentación ya mencionadas; que se proceda lo más pronto posible á la repoblación de esa vestidura de árboles en los lugares anteriores; que se evite la destrucción absurda de las frondosas arboledas que acorazan á algunas, annque muy pocas, de nuestras serranías principales; y por último, que se reglamente la explotación de los bosques, siguiendo un plan científico, y oyendo la opinión de personas especialistas en la materia, que estén dotadas de criterio recto y suficientemente ilustrado.

En las grietas, fracturas ó cavidades, de las rocas coherentes, el agua en su circulación subterránea no sufre autodepuración, pues cuando se contamina en la superficie de alimentación de los mencionados receptáculos acuíferos subterráneos, contaminada sale por los manantiales, sirviendo ella de vehículo para llevar á largas distancias, con los gérmenes mórbidos, algunas de las epidemias que se desarrollen en las referidas superficies de alimentación.

Antes se creía que una agua sólo por el hecho de provenir de un manantial debía considerarse excelente, como si los manantiales fueran aparatos misteriosos que la purificaran; (1) pero por desgracia esto no es exacto, sino que los manantiales son únicamente, como he dicho, los orificios de desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos. Por lo mismo, sólo que sean excelentes las aguas que circulan en estos receptáculos, lo serán también las que salen por los manantiales; y en caso contrario, como sucede muchas veces periódica ó constantemente, las aguas de algunos manantiales están contaminadas, y son peligrosas y detestables.

En vista de lo anterior, cuando el agua que sale por los manantiales ha circulado en el subsuelo solamente por cavidades supercapilares, en las que como he dicho no sufre autodepuración alguna, no son suficientes las análisis química y microbiológica para fallar acerca de la potabilidad de esa agua, sino que es indispensable para esto el estudio geológico de la región, pues no debe usarse una agua como potable aunque resulte muy pura según las análisis referidas, si ella está sujeta á causas de contaminación, porque de nada sirve que sea buena hoy, si puede ser mala mañana.

Cuando hay necesidad de usar como agua potable la que sale por los orificios de desagüe de los receptáculos acuíferos subte-

<sup>(1)</sup> Xavier Stainier. Bull, Soc. Belg. Géol. Paleón. d'Hydrol. **Tomo VII.** 1893. Pro. ver. pág. 150.

rráneos, que he descrito en este estudio, es indispensable que las Autoridades sanitarias protejan la superficie de alimentación de estos receptáculos, dictando las medidas adecuadas, prohibiendo hacer dentro de ellas sondeos, pozos, y en general excavaciones de más de dos metros de profundidad, y evitando sobre todo que en esa zona se establezcan cloacas, excusados ó cementerios, porque en muchos casos se ha comprobado hasta la evidencia, que algunas de las epidemias desarrolladas en las poblaciones que emplean el agua de manantiales como potable, son debidas á la contaminación temporal de esta agua en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, que desaguan por esos manantiales. (1)

Todas las ideas ya expresadas, relativas á la circulación subterránea del agua por las grietas, fracturas ó cavidades, de las rocas coherentes, han servido ya en México para evitar la pérdida de capitales en la perforación de pozos artesianos inútiles, y también para aumentar el volumen de agua que antes salía por los manantiales en varias localidades del país. Las mismas ideas serán más tarde un poderoso auxiliar para la agricultura en las partes altas, industria que aprovechará sin duda el agua subterránea que hoy baja por esas alturas para salir al exterior por manantiales situados más abajo, en lugares donde muchas veces son ya innecesarias esas aguas subterráneas para las necesidades de la agricultura.

Para terminar esta Memoria indicaré algunas de las principales conclusiones relativas à la captación de las aguas subterráneas que circulan en rocas coherentes agrietadas, conclusiones à las cuales he llegado después de estudiar esos receptáculas acuíferos en varias localidades del país.

Cuando las obras de captación se hacen en la superficie de terreno en donde se infiltran las aguas meteóricas, es decir, en la superficie de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, ó cuando esas obras cortan solamente á la región de alimentación de los mismos receptáculos, región ésta casi superficial, puede decirse que, el éxito de las obras referidas es casi nulo, y que estas últimas son más bien nocivas que benéficas á la circulación subterránea de las aguas meteóricas. En efecto, en la superficie y región de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos hay agua solamente en la época de lluvias, el agua en esos lugares es por lo

<sup>(1)</sup> Etude de M. le Prof. Fournier dans la region de la source d'Arcier analyse par M. E. Van den Broeck. Bull. Soc. Belg. Géol. Paleón. d'Hydrol. Tomo XVII. 1903. pág. 359.

tanto temporal y no permanente; y por lo mismo, por las referidas obras saldrá agua sólo en tiempo de lluvias, es decir, que con estas obras únicamente se consigue impedir la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, pues ellas hacen salir el agua al exterior cuando apenas comienza á infiltrarse en el terreno. En vista de todo esto, no deben recomendarse obras de captación que corten únicamente á la superficie y región de alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos.

Cuando las obras de captación á que me refiero cortan á la región activa de los receptáculos acuíferos subterráneos, es decir, á la región que contiene agua durante todo el año y que desagua poco á poco por manantiales, pueden presentarse entre otros los dos casos siguientes: ó el corte se hace arriba de los manantiales, ó se hace en el nivel inferior de los manantiales. En el primer caso, las obras de captación impiden que el agua continúe su descenso subterráneo y la obligan á salir at exterior á un nivel más elevado; por lo tanto, los manantiales se secan ó su gasto se reduce notablemente. Si es muy abundante la alimentación de los receptáculos acuíferos subterráneos, las obras mencionadas, al facilitar el desagüe de estos receptáculos, permitirán que salga por ellas anualmente mayor cantidad de agua de la que en igual tiempo salía antes por los manantiales; pero si la alimentación referida no es muy abundante, con esas obras sólo se consigue que el agua salga á mayor altura, pero su volumen no aumenta, ó en caso de anmentar su gasto no será permanente sino temporal, desapareciendo el agua en tiempo de secas. Cuando las obras de captación se hacen en el nivel inferior de los manantiales, como facilitan ellas el desagüe de los receptáculos acuíferos subterráneos, se consigue como en el caso anterior una de dos cosas: si la alimentación de estos receptáculos es voluminosa, aumenta con las obras la cantidad de agua que anualmente sale al exterior; pero si esa alimentación no es abundante, tampoco será permanente el aumento en el volumen de agua subterránea que salga al exterior, sino que este volumen llegará á ser nulo ó casi nulo en la temporada de secas.

Cuando las obras de captación cortan á la región acumulante de los receptáculos acuíferos subterráneos, es decir, á la región que se halla abajo del nivel inferior de los manantiales, aumenta la cantidad de agua que sale al exterior. En efecto, el nivel más bajo del desagüe natural de los referidos receptáculos subterráneos, es el nivel inferior de los manantiales, nivel que es influenciado notable-

mente por las variaciones en el relieve del terreno, y de este nivel para abajo el agua está sin salida natural al exterior; pero al cortarse esta región acumulante por obras que permitan su desagüe, saldrá por éstas toda el agua contenida desde el nivel inferior de los manantiales hasta el nivel de las obras de captación, y saldrá también el agua que anualmente se infiltre hasta el nivel de las referidas obras. Según esto, en una primera temporada será mucha la cantidad de agua que pueda salir por esas obras de captación, porque entonces existe una reserva de líquido acumulado durante muchos años; pero después, á medida que esa reserva vaya siendo menor, el volumen de agua que salga por las obras irá siendo también cada vez menor, hasta que anualmente este volumen sea cuando más igual á la cantidad de agua que durante el año se infiltre hasta la región del receptáculo acuífero subterráneo, que haya sido cortada por las obras de captación. En muchos casos sucede que el agua encuentra menos resistencias siguiendo los conductos que la llevan hasta las obras de captación, situadas abajo de los manantiales, que continuando su trayecto hacia estos últimos. Lo anterior se observa sobre todo cuando las obras cortan á los sistemas venosos principales que he descrito en este estudio; y entonces los manantiales se secan, y el agua prolonga su descenso subterráneo hasta llegar á las obras mencionadas por las cuales sale al exterior.

Cuando la última parte del trayecto subterráneo que sigue el agua para salir por los manantiales es ascendente, como sucede muchas veces, sobre todo si las aguas son termales, las obras de captación situadas abajo del nivel de los manantiales, al cortar á esos tramos ascendentes de la circulación acuífera subterránea, proporcionan una salida más fácil, y el agua sale por ellas en vez de continuar su ascenso hasta los manantiales, los cuales se secan por este motivo, ó su gasto disminuye notablemente. En ese último trayecto ascendente, el agua puede subir hasta cierto punto como límite, lugar que ha sido llamado "punto hidrostático." Según esto, los manantiales se encontrarán cuando más á la altura de este punto; pero si las obras de captación cortan á esos trayectos ascendentes á nivel más bajo que el anterior, la presión hidrostática será mayor, y por lo mismo saldrá mucha más agua por las obras de captación que por los manantiales situados arriba de las mismas obras. Este aumento en la cantidad de agua que sale al exterior será permanente cuando sea abundante la alimentación del receptáculo acuífero subterráneo, y este último sea bastante grande; porque entonces,

aun cuando se facilite el desagüe del receptáculo, la cantidad de agua contenida en el subsuelo será suficiente para garantizar la salida de este líquido durante todo el año, por las referidas obras de captación.

Cuando un receptáculo acuífero subterráneo no tiene desagüe natural, es decir, cuando no tiene manantiales, entonces no hay región activa en ese receptáculo, sino que toda la parte que está abajo de la región de alimentación debe considerarse como zona acumulante; y por lo mismo, las obras que cortan á este receptáculo más abajo de la región de alimentación, permitirán que salga al exterior regular cantidad de agua.

Para aplicar con éxito las reglas anteriores, es indispensable hacer estudios geológicos locales muy detallados, los cuales conducirán á la resolución clara, precisa y adecuada, para el caso particular.

Por último diré, que los estudios de hidrología subterránea son en México muy interesantes, en vista de la necesidad, cada día mayor, de aprovechar las aguas subterráneas, tanto en las poblaciones para usos domésticos, como en la agricultura para su mejor y completo desarrollo.

México, Agosto de 1910.