



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIONES DE LA QUÍMICA A LA
INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A

Alan Sebastian Rivera Rodríguez

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Ing. Javier Arellano Gil



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Dirección General de Asuntos
del Personal Académico

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), dentro de las actividades para la elaboración del libro: “Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones” para el proyecto PAPIME No.- PE103116 y gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el apoyo brindado para realizar esta tesina del proyecto PAPIME.

Agradecimientos

Gracias por el apoyo y al trabajo en la elaboración del libro “Química para Ciencias de la Tierra: fundamentos y aplicaciones”, cuya colaboración fue la piedra angular de este material didáctico, a:

Dra. Ana Laura Pérez Martínez, Rogelio Soto Ayala, Javier Arellano Gil, por sus aportaciones en las aplicaciones de la Química como herramienta en la formación integral de los estudiantes de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Rubí Villegas por su trabajo sobre lodos de perforación.

Al Ing. Alberto Arias Paz, Ing. Gabriel Salinas Calleros, por sus aportaciones en aplicaciones de la Química a la hidrogeología.

A Antonio Hernández Espriú, Berenice Zapata-Norberto, Luis Velázquez Aguirre, Sergio Macías Medrano, Alonso Soberón, por sus aportaciones en la aplicación de la química en modelación hidrogeoquímica en recargas gestionadas de acuíferos.

A Gabriel Ramírez Figueroa y a José Enrique Santos Jallath por sus aportaciones en las aplicaciones de la Química a la Minería

A Iza Canales García, Isabel Domínguez Trejo y Antonio de Jesús Mendoza Martínez por sus aportaciones de las aplicaciones de la Química en los métodos geofísicos.

A Dios

A mi Familia

A mis Padres

A mis Hermanos

Por siempre creer en mí

Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	2
I.- Introducción.....	3
1.1 Metas y Objetivos.....	4
1.2 Problemática.....	4
1.3 Metodología.....	5
II.- Aplicaciones a la Geología del Petróleo.....	6
2.1 Inyección de agua viscosa (polímeros).....	9
2.2 Poliacrilamida.....	11
2.3 Biopolímeros.....	12
2.4 Métodos alcalinos.....	13
2.5 Métodos de baja tensión.....	14
2.6 Lodos de perforación.....	17
2.7 Discusión.....	18
III.- Aplicaciones a la hidrogeología.....	19
3.1 Calidad del agua en norias.....	21
3.1.1 Sistema Acuífero.....	22
3.1.2 Calidad del Agua Subterránea.....	22
3.1.3 Coliformes Fecales y Coliformes Totales.....	23
3.1.4 Representación de la Concentración iónica mediante diagramas.....	24
3.2 Modelado hidrogeoquímico para recarga gestionada.....	25
3.3 Discusión.....	28
IV.- Aplicaciones a la Minería.....	30
4.1 Los explosivos en la minería.....	31
4.2 Sistemas de tratamiento de Drenaje Ácido de Mina.....	33
4.2.1 Neutralización de Drenaje Ácido de Mina en México.....	38
4.3 Discusión.....	42
V.- Aplicaciones a los Métodos Geofísicos.....	44
5.1 Métodos gravimétricos.....	45
5.2 Métodos magnetométricos.....	47
5.3 Métodos sísmicos.....	49
5.4 Métodos eléctricos.....	51
5.5 Métodos electromagnéticos.....	53
5.6 Discusión.....	54
VI.- Conclusiones.....	56
Bibliografía.....	58
Adjunto 1.- Presentación material didáctico.....	60

Resumen.

En este material didáctico se presentan aplicaciones de la Química a la Ingeniería en Ciencias de la Tierra, las cuales son dirigidas principalmente a los alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para la asignatura “Química de Ciencias de la Tierra”. De esta manera se dispone de información relevante y de utilidad para sus estudios de los semestres iniciales, en las asignaturas correspondientes a su carrera y posteriormente para su desarrollo profesional y laboral.

En Geología del Petróleo, la aplicación de la Química se presenta por la composición y uso de los hidrocarburos, también se relaciona con los componentes o materiales que permiten la explotación e industrialización, particularmente en los lodos de perforación y en las sustancias químicas que se utilizan en la recuperación mejorada de hidrocarburos, entre otros.

En el caso de la recuperación mejorada de hidrocarburos, se han diseñado métodos térmicos y de inyección de agua con productos químicos, buscando mejorar la relación de movilidades entre el aceite y el agua por medio de inyección de agua viscosa (polímeros), métodos alcalinos, métodos de baja tensión (surfactante), con la finalidad de extraer aceite residual de campos maduros.

El estudio de las propiedades químicas del agua superficial y subterránea se realiza por medio de la hidrogeoquímica, la cual involucra el análisis de los iones disueltos en agua y los procesos de interacción agua-sólido. Los iones fundamentales son Cloruro (Cl), Sulfato (SO₄), Bicarbonato (CO₃H⁻), Sodio (Na⁺), Calcio (Ca⁺⁺) y Magnesio (Mg⁺⁺), estos son estudiados y analizados para conocer la composición y calidad del agua para uso industrial, agrícola o doméstico.

Esto permite aplicaciones de la Química en hidrogeología como la evaluación de procesos de mezcla, especiación química, índices de saturación, sorción y transporte reactivo entre diferentes componentes presentes en el agua.

Las aplicaciones de la Química en la Minería se presentan cuando se conoce la composición química de los minerales a explotar, en la composición de los explosivos utilizados que permiten explotar los recursos que tienen las rocas de forma eficiente y en menor tiempo, en los sistemas de evaluación por contaminación, como ocurre con el tratamiento de drenajes ácidos de mina y de otros desechos producto de la explotación y concentración de elementos de interés.

Las aplicaciones de la Química en los métodos geofísicos se observan en la ciencia pura al interpretar la composición química de las capas de la Tierra, y en la ingeniería aplicada en la explotación y prospección de yacimientos petroleros y minerales que se caractericen por la composición, densidad o magnetismo de sus rocas y minerales, en la detección de domos salinos o diapiros, en la investigación de la calidad del agua, en detección de la interfase agua dulce/salada, entre otras aplicaciones.

Abstract.

In this teaching material presents applications of Chemistry to Engineering in the Earth Science, which are addressed mainly to the students of Faculty of Engineering of the UNAM, for the subject "Chemistry of Earth Sciences". In this way, relevant and useful information is available for the studies of the initial courses, and in the subjects corresponding to their careers and later for his professional and work development.

In Petroleum Geology, the application Chemistry is presented by the composition and use of hydrocarbons, also relates to the components the materials that allow exploitation and industrialization, particularly in drilling muds and chemical substances that are used in enhance oil recovery (EOR), among others.

In the case of enhance oil recovery, thermal methods and water injection with chemistry products have been designed, seeking to improve mobilities relation between oil and water by viscous water (polymers), alkaline methods and surfactants.

The study of the chemistry properties of surface and groundwater is carried out by hydrogeochemistry, which involves the analysis of dissolved ions in water and water-solid interaction processes. The basic ions are Chloride (Cl), Sulfate (SO₄), Bicarbonate (CO₃H⁻), Sodium (Na⁺), Calcium (Ca⁺⁺) and Magnesium (Mg⁺⁺). These are studied and analyzed for the composition and quality of the water for Industrial, agricultural or domestic use.

This allows applications of chemistry in hydrogeology as the evaluation of mixing processes, chemical speciation, saturation indexes, and reactive transport between different components presents in water.

The applications of Chemistry in Mining are presented when the chemical composition of the minerals to be exploited is known, in the composition of the explosives used to exploit the resources of the rocks in an efficient time, in the systems of pollution assessment, as in the treatment of acid mine drains and other wastes resulting from the exploitation and concentration of elements.

The applications of chemistry in geophysical methods are observed in science when the chemical composition of the Earth's layers is interpreted, in applied engineering in the exploration and prospecting of oil and ore deposits that are characterized by composition, density or magnetism of its rocks and minerals, in the detection of saline domes or diapires, in the investigation of the quality of water, in the detection of the freshwater / salt interface, among other applications.

I.- Introducción.

A lo largo de la historia de la humanidad el conocimiento de la Química ha sido de trascendental ayuda, ya que ha permitido conocer mejor los fenómenos de transformación de la materia que se llevan a cabo y que suceden en cualquier parte del sistema Tierra. Prácticamente no existe una actividad desarrollada por el hombre en la cual no esté involucrado algún concepto relacionado con la Química.

Un ejemplo de ello es el entendimiento de la génesis de las rocas calcáreas, que es de gran importancia en las ingenierías relacionadas con las Ciencias de la Tierra, ya que en muchos casos esas rocas se asocian con recursos naturales como el petróleo, el agua y los minerales.

En el proceso de enseñanza-aprendizaje es difícil trasladar lo aprendido en los primeros semestres de las carreras de Ingeniería en Ciencias de la Tierra hacia los últimos o en el ámbito laboral, debido a que los conceptos revisados en los cursos tradicionales de Química no redundan en las posibles aplicaciones hacia proyectos de ingeniería, por lo que los alumnos perciben la asignatura de una forma abstracta, lo que trae como consecuencia que no logren completamente el aprendizaje significativo, que no tengan motivación y que no se tengan los niveles óptimos de acreditación de la asignatura.

El material didáctico es una de las herramientas que facilitan la transmisión de conocimientos, permiten la enseñanza y el aprendizaje de una persona mediante el desarrollo de habilidades, actitudes, experiencias, etc. Este trabajo está enfocado en esta actividad, desarrollando los temas de aplicación de la Química a la Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

La importancia de este trabajo es elaborar material didáctico de Química, con las aplicaciones de ingeniería dirigidos a los alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en el área de Ciencias de la Tierra, particularmente de las carreras de Ingeniería Geológica, Ingeniería Geofísica, Ingeniería Petrolera e Ingeniería en Minas y Metalurgia; de esta manera se dispondrá de información relevante y de utilidad para sus estudios de los semestres iniciales donde se imparten las ciencias básicas o en las asignaturas correspondientes a su carrera y posteriormente para su desarrollo profesional y laboral.

Se pretende que este material didáctico sea usado por estudiantes de las ingenierías en Ciencias de la Tierra que se encuentren cursando la materia de primer semestre "Química de Ciencias de la Tierra" en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; quienes serán capaces de comprender y discutir los fundamentos en los cuales se basan algunos de los métodos y/o procedimientos utilizados en Química, fomentando su razonamiento crítico y deductivo; logrando el aprendizaje constructivo y productivo, que los motive a profundizar estos conocimientos y, por consiguiente, aumentar los índices de aprobación en las asignaturas de Ciencias Básicas.

Además, los profesores podrán utilizar este material didáctico como una herramienta importante para impartir su asignatura y utilicen otros métodos y/o procedimientos llevados a cabo por los ingenieros de Ciencias de la Tierra, involucrando a sus alumnos en el estudio de la Química y motivándolos a mejorar su aprendizaje.

1.1 Metas y Objetivos.

Elaborar material didáctico como parte de la realización del libro “Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones”, dentro de un proyecto DGAPA-PAPIME PE103116, apoyando en la elaboración de las aplicaciones de la Química en Geología del Petróleo, Hidrogeología, Minería y Métodos Geofísicos, con conceptos actualizados y orientados a mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de los estudiantes en Ingeniería en las Ciencias de la Tierra de nivel licenciatura, de las carreras de Ingeniería Geológica, Geofísica, Petrolera y en Minas y Metalurgia.

Mediante la investigación, el análisis y la síntesis de las aplicaciones que tiene la Química en Ingeniería en las Ciencias de la Tierra este trabajo contribuirá en el logro de aprendizajes significativos de los estudiantes, motivando a profundizar en estos temas, además de reducir el índice de reprobación y por consecuencia que tengan un aprovechamiento obteniendo buenas bases del conocimiento que será de utilidad para mejorar su éxito profesional y laboral.

1.2 Problemática.

Es común encontrar entre los estudiantes de Ciencias de la Tierra, desinterés por el aprendizaje de ciertas disciplinas, una de ellas la Química, porque el estudiante de los primeros semestres de la carrera de ingeniería no encuentra la relación entre los principios de la Química y su futura vida profesional, le resulta difícil establecer la relación en este caso de la Química con las Ciencias de la Tierra. Esto lleva al desinterés, provocando el deficiente aprendizaje y bajo desempeño en las asignaturas de ciencias básicas. Los fundamentos de la Química son importantes para la comprensión de diversos fenómenos o comportamientos de las sustancias o materiales que se estudian en Ciencias de la Tierra.

Como fuentes bibliográficas, existe escaso material enfocado en temas relacionados a las aplicaciones de la Química a la Ingeniería en Ciencias de la Tierra y lo que hay publicado no está enfocado a esa área del conocimiento. Así es como nace la idea de crear un material que sea claro y conciso, dirigido a los estudiantes de los primeros semestres de la carrera de ingeniería, con el cual mejore su interés y sus conocimientos al disponer de teoría y aplicaciones específicas.

Se pretende incrementar el interés del estudio de la Química, mediante textos, material didáctico claro y conciso, para que cuando sea consultado, se tenga información validada y útil que contribuya con el aprendizaje significativo; ya que la mayoría de las veces los libros o los materiales que se encuentran a disposición de

la población estudiantil sobre este tema, se encuentran redactados de una manera muy técnica, lo que dificulta su comprensión. Se pretende que el material didáctico tenga un enfoque práctico, de utilidad y de fácil acceso para los estudiantes interesados en el tema.

1.3 Metodología.

1) En la elaboración de este material didáctico, se realizó la recopilación y revisión de la bibliografía de Química, ya sea digital o en material impreso, sobre teoría y también de las aplicaciones que tiene la Química a la Ingeniería en las Ciencias de la Tierra, en las áreas de Geología de Petróleo, Hidrogeología, Métodos Geofísicos y Minería.

2) Se realizó el análisis de la información que permitió la selección de textos y se clasificó de acuerdo a su contenido y a sus aplicaciones de la Química a la Ingeniería en las Ciencias de la Tierra.

3) Se estructuraron y redactaron las ideas principales de los contenidos de cada tema. En la síntesis de la información se obtuvo, lo más relevante de la Química y sus aplicaciones a la Ingeniería en las Ciencias de la Tierra.

4) Se elaboraron textos con los contenidos de cada tema de una manera clara y concisa, donde además de mostrar la información de la Química, se resalta su relación y aplicación a la Ingeniería en las Ciencias de la Tierra. Se tomó en cuenta el uso de lenguaje técnico y formal que permita una fácil lectura y comprensión de los temas desarrollados.

5) Se elaboraron figuras, gráficos y se editaron imágenes que forman parte del texto relacionado con la Química y sus aplicaciones a la Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

6) Se elaboró el texto final con la edición correspondiente.

II.- Aplicaciones a la Geología del Petróleo.

La relación entre la Química y Geología del Petróleo está basada primordialmente por la composición y uso de los hidrocarburos, y en los componentes o materiales que permiten la explotación y uso de los mismos. Tiene que ver con el estudio de la química de los hidrocarburos líquidos, sólidos y gaseosos, además de los lodos de perforación y las sustancias que se utilizan en la recuperación mejorada de hidrocarburos, entre otros.

La Química Orgánica estudia los compuestos que provienen de organismos vivos, formados principalmente por carbono e hidrógeno (hidrocarburos), así como la síntesis de compuestos que provienen de materia no viva (inorgánicos), con los cuales generan productos de vital importancia para el ser humano.

Los hidrocarburos se extraen de los yacimientos petroleros, y en función de su calidad y grado de saturación, son clasificados como alcanos, alquenos y alquinos, los cuales presentan un tipo de hibridación sp^3 , sp^2 , sp , es decir, enlace simple, doble y triple, que forman un ángulo entre sus enlaces de 109° , 120° y 180° , respectivamente.

Los alcanos son hidrocarburos saturados de cadena abierta o cerrada (cicloalcanos) que poseen enlaces sencillos y cuya fórmula general es C_nH_{2n+2} .

Los alquenos, hidrocarburos saturados de cadena abierta o cerrada (cicloalquenos), unidos por un doble enlace, y cuya fórmula general C_nH_{2n} .

Los alquinos, compuestos insaturados de cadena abierta unidos por un triple enlace (formando un ángulo de 180°), con fórmula general C_nH_{2n-2} .

Las propiedades y características de los alcanos, alquenos y alquinos son relevantes para el desarrollo industrial y tecnológico, y el avance científico ha permitido utilizar en distintas áreas como en las industrias farmacéutica y petroquímica, generando productos como medicamentos, polímeros, fertilizantes, conservadores naturales, etc., que se utilizan para lograr una mejor calidad de vida de los seres humanos.

La relevancia de cada uno de estos compuestos está referida a su importancia económica en el caso de hidrocarburos como gas, gasolina, diésel y turbosina que son la principal fuente de energía a nivel mundial. En el caso de la importancia industrial como materia prima, los alcanos, alquenos y alquinos, se utilizan para generar otro tipo de compuestos o productos, tales como los polímeros que se utilizan para la fabricación de plásticos, poliésteres, polipropileno, cloruro de polivinilo, poliuretanos, polietileno, nylon, prótesis, recubrimientos, resinas, etc.

Los hidrocarburos se generan a través de la transformación de plantas y animales (materia orgánica) preservados en las secuencias sedimentarias acumuladas en ambientes anóxicos debido a altas presiones y temperaturas que han experimentado a lo largo de mucho tiempo.

Los hidrocarburos se extraen directamente del subsuelo de dos tipos de yacimientos, los hidrocarburos convencionales que cumplen con el sistema petrolero y que se extraen debido a la propia presión del fluido y los no convencionales que, son aquellos que requieren de otras herramientas y técnicas para su extracción, como el fracturamiento de la roca, lo que permite recuperar volúmenes importantes de hidrocarburos. También se puede obtener una mayor recuperación al inyectar CO₂ o N₂ a presión en los pozos de inyección para producir un incremento de presión y lograr extraerlos más eficientemente por procesos de recuperación secundaria y mejorada.

El concepto de “sistema petrolero” se aplica en la exploración petrolera cuando se tienen los componentes geológicos y geoquímicos relacionados, como es la presencia de la roca generadora, almacenadora, sello, trampa, migración y sincronía que favorecen se forme un yacimiento petrolero, en cambio los hidrocarburos no convencionales tienen una gran variedad de origen y no tienen los componentes típicos de este sistema.

Los hidrocarburos que se encuentran en forma líquida reciben el nombre de petróleo o crudo, mientras que los que se encuentran en estado gaseoso se les conoce como gas natural (con metano, etano, propano, butano, etc.); en algunos casos se pueden tener hidrocarburos en fase sólida que se conoce como chapopote o gilsonita.

En un aspecto muy general, el petróleo tiene diferentes clasificaciones, por ejemplo, la que tiene que ver con el tipo de molécula y sus estructuras; otra de ellas son los grados API (American Petroleum Institute), por sus siglas en inglés.

El crudo se utiliza para diferentes fines dependiendo su nivel de pureza y densidad, por lo que los aceites ligeros se pueden aprovechar mejor para la producción de gasolina, turbosina, diésel y aceite lubricante; aunque también de los aceites pesados se pueden obtener los mismos productos, aunque en proporciones diferentes.

En México, el crudo que se obtiene de sus campos petroleros contienen alcanos, alquenos y alquinos que están estrechamente relacionados, los que para fines de comercialización se clasifican en tres tipos; el crudo pesado o tipo Maya de 22° API, con 3.3% de azufre en peso; el crudo ligero o tipo Istmo de 33° API con 1.3% de azufre en peso, y el crudo super ligero o tipo Olmeca de 38° API con 0.8% de azufre en peso.

Como producto final de los alcanos, alquenos y alquinos que se encuentran en los aceites crudos tenemos un ejemplo que se puede obtener como producto de la destilación o en la petroquímica básica de un aceite crudo ligero de 35°API, de los cuales son extraídos por destilación como productos útiles, la gasolina con contenido de átomos de carbono de 5 a 10 (C₅ a C₁₀) que representan del 27% del 100% del crudo original, mientras que el Keroseno (C₁₁ a C₁₃) representa el 13%, el Diesel (C₁₄ a C₁₈) del 12%; el 10% en Aceite Pesado (C₁₉ a C₂₅); 20% de Aceite

Lubricante (C₂₆ a C₄₀) y por último el 18% de residuos con más de 40 átomos de carbono en su molécula, completando el 100% del aceite crudo.

La siguiente aplicación fue desarrollada por Pérez Martínez Soto Ayala, Arellano Gil (2016 y 2017), cuyas características y elementos principales se presentan en la recuperación secundaria y mejorada:

Mediante la perforación de pozos se llega a los yacimientos para obtener el crudo, y dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, se realiza la explotación del yacimiento, donde tradicionalmente existen tres fases en su extracción: recuperación primaria, recuperación secundaria y mejorada.

En la recuperación primaria se aprovecha la presión del yacimiento drenando el petróleo naturalmente. La durabilidad de este periodo es variable, pero siempre se lleva a cabo para obtener información del yacimiento. Esta etapa termina cuando la presión baja drásticamente o se empiezan a producir cantidades importantes de otros fluidos, como gas y agua. En esta etapa se puede recuperar desde el 5 % hasta el 20 % del crudo remanente, dependiendo del yacimiento (ver referencia 16).

Antiguamente se explotaba el yacimiento mediante recuperación primaria hasta que los gastos de explotación se volvían prohibitivos, en cuyo momento se pasaba a los métodos de recuperación secundaria. Hoy en día se inician las operaciones de recuperación secundaria mucho antes de llegar a este punto y el método de explotación a usar en un yacimiento o en una parte de un yacimiento obedece a criterios de optimización

La recuperación secundaria consiste en inyectar dentro del yacimiento un fluido menos costoso que el petróleo para mantener un gradiente de presión. Estos fluidos se inyectan por ciertos pozos, llamados inyectoras, y desplazan o arrastran una parte del petróleo hacia los otros pozos productores (ver referencia 16).

Después de las recuperaciones primaria y secundaria, el yacimiento aún contiene en promedio un 72% de petróleo, el cual es muy deseable recuperar. Actualmente se utilizan métodos para poder explotar aún más el petróleo contenido en el yacimiento, ya sea por estar atrapado en los poros mediante la generación de fuerzas capilares o por la geometría misma del pozo que no es favorable para su explotación. Para estos casos, se utiliza la recuperación mejorada (Enhanced Oil Recovery, EOR), en la cual se inyectan otras sustancias diferentes al agua, con la intención de aumentar la recuperación final del crudo (ver referencia 16).

Entre los métodos cuyo propósito es mejorar la eficiencia del desplazamiento mediante una reducción de las fuerzas capilares, se encuentra el uso de disolventes miscibles con el crudo y el empleo de disoluciones de surfactantes o disoluciones alcalinas, que favorecen bajas tensiones interfaciales. Para mejorar la eficiencia de barrido, se puede reducir la viscosidad del crudo mediante calentamiento, aumentar la viscosidad del agua con polímeros hidrosolubles, o taponar los caminos preferenciales (por ejemplo, con espumas) (ver referencia 16).

Todas estas alternativas de la recuperación mejorada involucran fenómenos químicos que el Ingeniero Petrolero aprovecha para poder optimizar la producción del petróleo de un yacimiento.

Los métodos más usados en la EOR son principalmente térmicos y de inyección de agua con productos químicos. Los procesos químicos buscan mejorar la relación de movilidades entre el aceite y el agua, a través de la adición de productos químicos a este último componente.

Algunos de estos procesos son:

- Inyección de agua viscosa (polímeros)
- Métodos alcalinos
- Métodos de baja tensión (surfactante)

Si la formulación del compuesto químico a utilizar es apropiadamente diseñada y controlada para las condiciones de flujo en el yacimiento, éstos pueden llegar a tener un alto potencial para alcanzar excelentes recuperaciones de aceite comercial.

A continuación, se describen las principales características de las sustancias que se utilizan en la recuperación secundaria y mejorada de hidrocarburos.

2.1 Inyección de agua viscosa (polímeros).

Su propósito es reducir la relación de movilidades agua-aceite, de tal manera que, si aumenta la viscosidad del agua y se aproxima a la viscosidad del aceite, la relación de movilidades baja y evita que el agua viaje por canales de mayor permeabilidad (ver referencia 16).

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_w \mu_o}{k_o \mu_w}$$

donde:

λ_w = movilidad del agua, mD/cp.

λ_o = movilidad del aceite, mD/cp.

k_w = permeabilidad efectiva al agua, mD.

k_o = permeabilidad efectiva al aceite, mD.

μ_w = viscosidad del agua, cp.

μ_o = viscosidad del aceite, cp.

Para que una solución polimérica inyectada sea efectiva, debe permanecer estable por un periodo largo de tiempo a las condiciones del yacimiento. Los polímeros son sensibles a degradaciones térmicas, químicas, mecánicas y microbianas. De éstas, las más severas son las debidas a la temperatura y a la salinidad, ya que se ha comprobado que las soluciones de macromoléculas pueden trabajar bien con degradaciones mecánicas y microbianas en los yacimientos (ver referencia 16).

En el mundo de los polímeros existen una inmensa variedad, sin embargo, como ejemplo sólo nos enfocaremos en los que se usan principalmente en la extracción

del crudo. En términos generales el término polímero se deriva de las palabras griegas “polys” que significa muchos y “meros” que significa partes o unidades; así, un polímero es un producto químico constituido por macromoléculas en forma de cadenas formadas por moléculas simples, llamadas monómeros (Figura 2.1). Estos forman largas cadenas que se unen entre sí por fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno o interacciones hidrofóbicas (ver referencia 16).

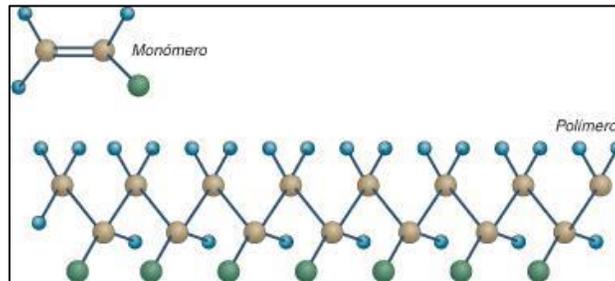


Figura 2.1. Ejemplo de un polímero y su monómero.

Para que un compuesto químico funcione como monómero deberá tener al menos dos sitios reactivos, en los cuales otro monómero pueda unirse y formar el polímero. La característica principal es su gran masa molar que puede oscilar entre los miles y millones de gramos y es proporcional al grado de polimerización; es decir, del número de monómeros presentes en el polímero (ver referencia 16).

Cuando se lleva a cabo la perforación de un pozo, las presiones naturales del pozo proporcionan fuerza suficiente para extraer un 20 a 30% de crudo contenido en la formación. Una de las técnicas más efectivas para extraer el crudo restante es el arrastre con soluciones acuosas de viscosidad elevada. Esta técnica es capaz de proporcionar una extracción del 70% del crudo en la formación. El rol de éstos polímeros en la recuperación mejorada de crudo es el de incrementar la viscosidad de la fase acuosa. Los polímeros solubles en agua reducen la movilidad de la fase acuosa incrementando su viscosidad y reduciendo la permeabilidad de la roca porosa al agua.

El objetivo de la inyección de polímeros para la recuperación mejorada de hidrocarburos es obtener un mejor desplazamiento y una mejor eficiencia volumétrica de barrido en un proceso de inyección de agua. Los polímeros usados en estos procesos se clasifican de manera general en dos tipos: polímeros sintéticos y biopolímeros, siendo el polímero sintético más común la poliacrilamida y el biopolímero más común la xantana.

La poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) y la goma Xantana (XG) son polímeros que reducen la movilidad mediante el incremento de la viscosidad. Cabe mencionar que la HPAM puede alterar el patrón de flujo mediante la reducción de la permeabilidad relativa de la formación al agua; esta reducción puede ser permanente, mientras que la permeabilidad relativa al aceite puede permanecer sin algún cambio aparente. La inyección de agua con polímeros puede ofrecer una

producción adicional de aceite a la obtenida con la inyección de agua llana debido a que mejora la eficiencia de desplazamiento.

2.2 Poliacrilamida.

Un producto utilizado en la recuperación mejorada es la poliacrilamida, que corresponde con un polímero sintético de cadenas más largas que tiene la fórmula química $(C_3H_5NO)_n$. La unidad de repetición básica o monómero de poliacrilamida es una combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (Figura 2.2).

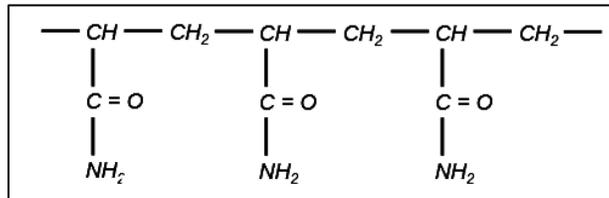


Figura 2.2. Estructura de Poliacrilamida.

La estructura de las poliacrilamidas está compuesta por una cadena muy larga, formada de forma sintética, en el laboratorio de química, por la repetición del monómero acrilamida; la masa molar promedio de las poliacrilamidas disponibles en el mercado se encuentra en el rango de 1 a 10 millones gramos por cada mol de polímero, lo que significa que hay millones de monómeros en cada cadena polimérica y esto ayuda a que bajas concentraciones de polímero aumenten significativamente la viscosidad de la disolución (ver referencia 16). Las poliacrilamidas aumentan la viscosidad de los bolsones de agua que preceden a la inyección final de agua. Las poliacrilamidas se utilizan frecuentemente como reductores de movilidad en operaciones de inundación con polímeros micelares.

Una de las principales ventajas de este polímero es que se puede llevar a cabo la hidrólisis parcial del polímero, sustituyendo los grupos amida por grupos carboxilo, creando poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas, lo que las hace más solubles en agua dulce que en agua salda, debido a las fuerzas intermoleculares ion-dipolo que se pueden crear entre el ion de sodio (Na^+) introducido al polímero y el agua que es una molécula polar, por lo tanto estas moléculas poseen una polaridad muy alta, lo que las hace muy afines al agua, pero no al petróleo; además, son relativamente inmunes al ataque bacterial (ver referencia 16).

En la explotación de petróleo el polímero poliacrilamida se puede utilizar como fluido de perforación, fluido de fracturación, y las inundaciones de polímero para la recuperación mejorada de hidrocarburo.

El papel de la poliacrilamida es la regulación de la reología de inyección de agua, al aumentar la viscosidad del fluido de conducción, mejorar la eficiencia de inyección de agua y la reducción de la permeabilidad de la formación de fase agua, de modo que el agua y el aceite puedan fluir hacia adelante de manera uniforme.

La poliacrilamida permite controlar la movilidad de los fluidos que se observa en la eficiencia de la recuperación; esto provoca que el aceite residual se desplace de

forma constante y uniforme hasta el pozo; incrementa la viscosidad del fluido, gana espacio y minimiza pérdidas por dilución.

Otro aspecto importante es que evita que el agua conductora (el agua que desplaza a los polímeros y la micro emulsión a través de la reserva) invada la micro emulsión.

2.3 Biopolímeros.

En la recuperación mejorada también se pueden utilizar biopolímeros o polisacáridos que son derivados de procesos de fermentación de forma natural, sin la intervención del hombre directamente. El biopolímero más común es la *goma Xantana*, la cual es producida por la bacteria *xanthomonas campestris* (Figura 2.3) (ver referencia 16).

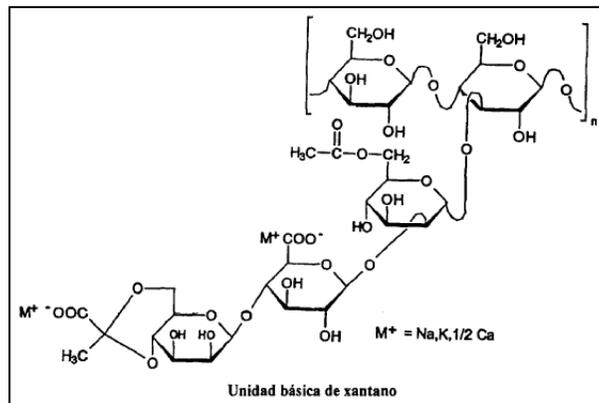


Figura 2.3. Unidad básica de Xantana.

Su estructura química es mucho más compleja que la correspondiente a las poliacrilamidas, la cadena de este polímero es rígida, debido a los ciclos de carbono que contiene la estructura, lo que la hace muy resistente a la degradación mecánica (ver referencia 16).

Este tipo de biopolímeros se caracteriza por aumentar significativamente la viscosidad del agua con alta salinidad, por su afinidad, ya que el Xantana contiene varias partes iónicas que pueden interactuar con los iones disueltos en agua, lo que da como resultado una interacción ion-ion que proporciona alta estabilidad a la mezcla, debido a que se forma un arreglo de las cargas; sin embargo, en agua dulce tiene menor respuesta que la poliacrilamida.

En cuanto a la masa molar promedio de los biopolímeros es menor que el de las poliacrilamidas, son del orden de 2 a 5 millones. Por su naturaleza, estos polímeros son muy susceptibles al ataque bacteriano, por lo que sus soluciones deben tratarse con un agente biocida y una sustancia para eliminar el oxígeno disuelto que contrarresten el daño de las bacterias antes de ser inyectados al yacimiento (ver referencia 16).

Para la recuperación mejorada de hidrocarburos el polímero Xantana en lodos a base de agua proporciona una reología de lodo no newtoniano, altamente deseable

debido al perfil plano de velocidad que produce en el flujo anular, lo que se requiere para una elevación eficiente de los recortes de perforación en lodos de densidades inferiores. El polímero Xantana tiene tolerancia a la salinidad y tolerancia regular a los iones de dureza.

Este polímero actúa como una varilla semi rígida en el yacimiento, y es resistente a la degradación mecánica.

2.4 Métodos alcalinos.

Consiste en la inyección en el yacimiento de disoluciones alcalinas, conocidas como bases en química por su pH superior a 7. Los más usados son el hidróxido de sodio (NaOH) y el carbonato de sodio (Na_2CO_3) con un pH entre 8 y 10. Estas disoluciones reaccionan con los ácidos orgánicos presentes naturalmente en los crudos, llevándose a cabo reacciones de neutralización, con lo cual se logra generar in situ las sales correspondientes (surfactantes naturales similares a los jabones) que traen como consecuencia directa mejoras en la movilidad del crudo a través del yacimiento y hacia los pozos productores (ver referencia 16)..

Los mecanismos que pueden incrementar potencialmente la recuperación de aceite del yacimiento pueden ser: por una disminución en la tensión interfacial entre el agua y el aceite, emulsificación del agua y el aceite, ayudando a vencer fuerzas capilares que promueven la salida del aceite del medio poroso y/o solubilización de las películas interfaciales; además, el producto químico alcalino puede reaccionar con la roca del yacimiento, provocando una alteración favorable.

Un surfactante o tensoactivo es una molécula anfifílica, esto es que cuenta con una parte polar (hidrofílica, afín al agua) y otra no polar o apolar (hidrofóbica, no soluble en agua), lo cual ayuda a que dos sustancias que son inmiscibles puedan aumentar su solubilidad o que se pueda generar disolución o se creen micelas donde la parte hidrofóbica encapsula el aceite y la parte hidrofílica queda expuesta al medio acuoso, donde varias micelas pueden formar una emulsión. En la superficie que separa dos fases, existe un desbalance de fuerzas moleculares (tensión interfacial) que se traduce en una fuerza neta que tiende a minimizar el área de contacto entre ambas fases, esa área de contacto se llama interfase, si se logran minimizar la tensión interfacial se logra aumentar el área de contacto y este hecho se puede lograr mediante el uso de un surfactante, el cual se obtiene con la introducción de una disolución básica al yacimiento (ver referencia 16)..

Por otra parte, se producen a menudo emulsiones que pueden ser favorables para formar taponamientos y realizar una reducción de movilidad a fracturas y poros del petróleo.

Los métodos alcalinos o cáusticos, son capaces de cambiar la mojabilidad de la roca del yacimiento, mediante las variedades de químicos, que son el hidróxido de sodio, el silicato de sodio y el carbonato sódico. Estos químicos pueden reaccionar con el petróleo, si este tiene suficiente cantidad de ácidos orgánicos, para generar surfactante in situ.

En general, la inyección de los métodos alcalinos el hidrocarburo se recupera mediante:

- Una reducción de la tensión interfacial resultante de la producción de surfactantes.
- Cambio en la mojabilidad de la roca, de ser mojada por aceite a ser mojada por agua.
- Cambio en la mojabilidad de la roca, de ser mojada por agua a ser mojada por aceite.
- Emulsificación y desplazamiento del aceite para ayudar al control de la movilidad.
- Solubilización de películas de petróleo y de la interface agua-aceite.

2.5 Métodos de baja tensión.

También conocido como desplazamiento micelar, es el proceso de recuperación mejorada en el que se inyecta un agente activo de superficie (surfactante) artificial. La composición de la mezcla inyectada (bache químico, fase intermedia entre el crudo y el agua de inyección) normalmente incluye algunos, o todos, de los siguientes elementos: agua, hidrocarburos, alcoholes, polímeros y sales inorgánicas (ver referencia 16).

El propósito de este método es mejorar la eficiencia del desplazamiento mediante una reducción de las fuerzas capilares. Se pueden presentar una reducción de la tensión interfacial con soluciones de surfactantes o soluciones alcalinas.

Los surfactantes son moléculas de cadena intermedia a larga que poseen tanto grupos hidrofílicos (que atraen en agua) como grupos hidrofóbicos (que repelen el agua). Por lo tanto, las moléculas se acumulan en la interfase agua-aceite y reducen la tensión interfacial entre las fases. Las fuerzas capilares impiden que el aceite se desplace a través de las restricciones mojables por agua, como las gargantas de poro, la reducción de estas fuerzas puede incrementar la recuperación. Cuando el número capilar es muy alto predominan las fuerzas viscosas y el aceite remanente puede ser desplazado.

La cantidad de hidrocarburo que se produce por energía natural del yacimiento o por la aplicación de mecanismos como la inyección de agua o gas, por lo general no es mayor al 40% de petróleo original en sitio, debido al efecto de las fuerzas viscosas que impiden la fluidez del petróleo y fuerzas capilares que retienen el hidrocarburo en el medio poroso. Es por ello, que la movilidad del petróleo residual está sujeta a una competencia entre las fuerzas viscosas y fuerzas capilares, que se expresa a través del denominado número capilar definido como:

$$Nc = \mu\gamma / (\sigma \cos\theta) \quad (a)$$

Donde:

μ : viscosidad del fluido desplazante.

γ : velocidad del fluido desplazante.

θ : ángulo de contacto.

σ : tensión interfacial.

En este sentido, la aplicación de surfactantes bajo condiciones físico-químicas apropiadas permite obtener valores de tensiones interfaciales pequeños, gracias al principio de absorción, el cual debería ser menor sobre la superficie de la roca, para evitar que se aumente el costo económico del proceso.

En todas las operaciones en que existen dos o más fases presentes, se encontrará la presencia de un surfactante con el propósito particular de estabilizar o desestabilizar una dispersión, una emulsión o una espuma, o para modificar la tensión interfacial o la mojabilidad.

De acuerdo a la carga que poseen los surfactantes se clasifican en: aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfotéricos. Para la recuperación mejorada del petróleo los surfactantes que se emplean son los aniónicos dentro de los que destacan los sulfonatos (SO_3^-), los cuales con base en su fórmula de agente tensioactivo permite optimizar el proceso de recobro.

La molécula del surfactante aniónico (cargado negativamente, SO_3^-) se descarga con un catión metálico inorgánico (generalmente sodio, Na) asociado con el monómero. Los surfactantes aniónicos son los más comunes en el desplazamiento micelar, son buenos surfactantes, relativamente resistentes a la retención y estables (Figura 2.4).

El surfactante más comúnmente utilizado en la recuperación mejorada es el sulfonato de petróleo, debido a su bajo costo, su obtención fácil en grandes cantidades y su gran actividad interfacial. El sulfonato de petróleo es un surfactante aniónico que puede producirse por sulfonación (introducción del grupo sulfónico – SO_3H) de:

- 1) Un químico orgánico puro (algunas veces conocidos como sulfonatos sintéticos),
- 2) Una corriente de refinación de masa molar intermedio, o cuando sea apropiado,
- 3) El aceite crudo del yacimiento.

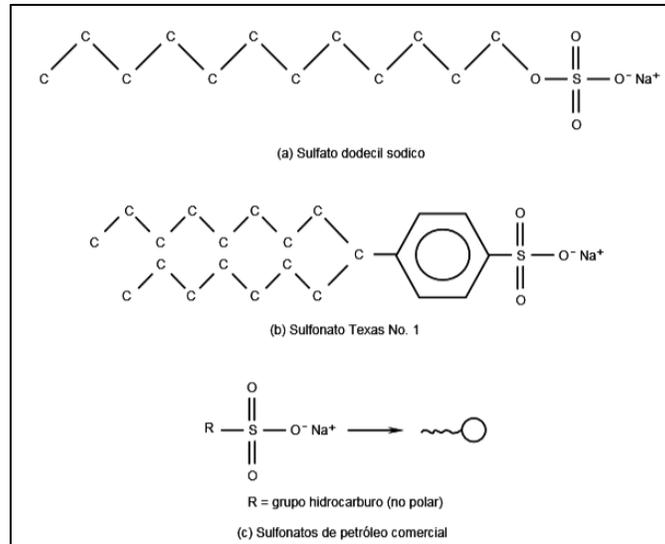


Figura 2.4. Estructuras moleculares representativas de los surfactantes.

El procedimiento de este método consiste en inyectar inicialmente un volumen de salmuera (disolución de gran cantidad de sal en H₂O) cuyo propósito es cambiar la salinidad del yacimiento, de tal forma que al mezclarse con el surfactante no cause disminución de la actividad interfacial. Luego se inyecta el bache micelar, el cual puede empujarse con una solución polimérica que mejore la relación de movilidades. Por último, se procede a la inyección de agua simple para empujar todos los baches inyectados a los pozos productores.

El fundamento de la tecnología en la recuperación mejorada se basa en la aplicación de un tapón de tensioactivos. Esto se logra, gracias a la creación de una microemulsión donde se busca establecer miscibilidad entre ambos fluidos dentro del medio acuoso, generando un banco de petróleo, es decir, una fase continua del crudo atrapado en los intersticios de la roca.

Seguidamente, se inyectan polímeros, lo que incrementa la viscosidad del agua e impide que su movilidad sea mayor a la del crudo. Esto ocasiona un aumento de la resistencia al flujo en zonas de alta permeabilidad, así como mayor empuje al banco de petróleo, lo que se traduce en un incremento en la eficiencia de barrido dentro del yacimiento. Por otra parte, el sistema de coalescencia producido por la aplicación de surfactantes reduce la saturación de petróleo residual, incrementando el recobro del hidrocarburo.

En general esta aplicación ayuda a la recuperación mejorada de hidrocarburos en:

- Reducir la tensión interfacial aceite-agua.
- Solubilización del aceite.
- Emulsificación.
- Mejoramiento de la movilidad.
- Creando una microemulsión de baja tensión interfacial, absorción del surfactante en la interfaz agua-petróleo.

- Incremento del número capilar, ocasionado miscibilidad en la interfaz líquido-líquido.
- Definición de una fase continua de petróleo.
- Aumentando la eficiencia de barrido entre el surfactante, el tensioactivo, el polímero y el agua de formación.

2.6 Lodos de perforación.

Se definen como una serie de fluidos líquidos, gaseosos y mezclas de fluidos y sólidos en forma de suspensiones de sólidos, mezclas y emulsiones que son utilizados en operaciones de perforación de pozos petroleros.

Se dividen en neumáticos, base agua y base aceite. Intervienen minerales como arcilla ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), galena (PbS), calcita (CaCO_3), barita (BaSO_4), polímeros, entre otros componentes.

Las aplicaciones más importantes son:

- Obtener los recortes de la formación a la superficie.
- Controlar las presiones de la formación.
- Estabilizar las paredes de la formación.
- Enfriar y lubricar la barrena.

Al perforar un pozo petrolero se generan recortes de formación en tamaños y cantidad según sea la barrena, la velocidad de penetración y el tipo de roca que se esté cortando. El lodo junto con el caudal de bombeo, debe ser capaz de acarrear estos recortes a la superficie dejando limpio el fondo del pozo.

Otro de los objetivos fundamentales de los lodos de perforación es controlar las presiones de la formación, ya que, en el subsuelo, toda formación tiene una determinada presión en sus poros denominada presión de poro o presión de formación.

Otra aplicación relevante de los lodos de perforación, estabilizar las paredes de la formación, la cual depende de sus características litológicas, así como de la profundidad y de las condiciones con las que se esté perforando, como también de las reacciones del lodo con la formación.

Para incrementar o controlar la densidad de los lodos de perforación, la industria petrolera cuenta con una amplia gama de productos químicos, entre los más utilizados se encuentran: la bentonita, carbonato de calcio, cloruro de sodio, cloruro de potasio, y óxido de hierro (Rubí Villegas, 2017).

2.7 Discusión.

La recuperación mejorada de hidrocarburos busca disminuir los efectos adversos de los factores que generan el entrapamiento del aceite, mediante diferentes métodos. El objetivo de la inyección de químicos es mejorar la eficiencia de barrido volumétrico del agua de inyección para recuperar la fase de aceite discontinua que se encuentra atrapada principalmente en la matriz de la roca.

Los procesos químicos utilizados en la recuperación mejorada (Inyección de agua viscosa o polímeros, métodos alcalinos y métodos de baja tensión o surfactantes) y si la formulación del compuesto químico a utilizar es apropiadamente diseñada y controlada para las condiciones de flujo en el yacimiento, éstos pueden llegar a tener un alto potencial para alcanzar excelentes recuperaciones de aceite comercial.

Todas las alternativas de la recuperación mejorada involucran fenómenos químicos que el estudiante en Ciencias de la Tierra debe de conocer como aplicaciones útiles que tienen la facilidad de incrementar el factor de recuperación de hidrocarburos líquidos de un yacimiento.

El conocimiento de química básica ayuda a la comprensión de cada uno de los mecanismos en la recuperación mejorada de hidrocarburos lo que propicia la aplicación de la teoría con la práctica que tiene como consecuencia un aprendizaje significativo en los estudiantes de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

III.- Aplicaciones a la hidrogeología.

La hidrogeología es la rama de la geología que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su origen, su circulación, sus condiciones geológicas, su interacción con los suelos, rocas y humedales; su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas) y su captación.

El estudio de las propiedades químicas del agua superficial y subterránea y su relación con la geología regional está dada por la hidrogeoquímica, de tal forma que se analizan los iones disueltos en agua y los procesos de interacción agua-sólido.

La hidrogeoquímica es una de las ramas de la hidrogeología mediante la cual es posible estudiar los procesos de interacción agua-roca y evaluar las reacciones químicas entre el agua subterránea nativa y agentes externos (ver referencia 9), entre muchas otras aplicaciones.

El agua es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con las diferentes litologías por las cuales circula en la escala del tiempo geológico. La mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Unos cuantos de estos iones se encuentran presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones presentes; estos son los iones fundamentales y sobre ellos descansará la mayor parte de los aspectos químicos e hidrogeoquímicos. Estos iones fundamentales son: Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}) Bicarbonato (CO_3H^-), Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{++}) y Magnesio (Mg^{++}) (ver referencia 2).

Es frecuente que los aniones nitrato (NO_3^-) y Carbonato (CO_3^{2-}) y el catión potasio (K^+) se consideren dentro del grupo de iones fundamentales aún cuando en general su proporción es pequeña.

Entre las sustancias disueltas poco ionizadas o en estado coloidal son importantes los ácidos y aniones derivados del sílice (SiO_2). El resto de los iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que los anteriores y se llaman iones menores a aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total y elementos traza a aquellos que, aunque presentes, están por lo general en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales (ver referencia 2).

Los iones menores más importantes son, además de los ya citados, el NO_2^- , F^- , NH_4^+ y Sr^{++} , que suelen estar en concentraciones entre 0.01 y 10 ppm partes por millón.

Los iones metálicos derivados del As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc., a veces están en cantidades medibles, pero en general son elementos traza. El resto de posibles iones están casi siempre en cantidades menores que 0.0001 ppm.

El agua subterránea llamada dulce contiene como máximo 1,000 o quizá 2,000 ppm de sustancias disueltas; si el contenido es mayor, por ejemplo, hasta 5,000 ppm se

llama agua salobre y hasta 40,000 agua salada. No es raro encontrar agua que supere las 40,000 ppm de sustancias disueltas llegando a veces hasta 300,000 ppm. A esta agua se le denomina salmuera y está asociada con frecuencia a depósitos salinos, agua de yacimientos petrolíferos o bien agua muy antigua situada a gran profundidad (ver referencia 2).

El mejor modo de expresar la fracción iónica disuelta en el agua es mediante un análisis químico en laboratorios certificados. Si éste es completo, la primera comprobación a realizar es el balance de aniones y cationes (ver referencia 2).

El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de agua de un mismo lugar en épocas diferentes o de diferentes lugares. Estas gráficas y diagramas pueden representar variaciones temporales, espaciales o bien resaltar relaciones entre los iones de una misma muestra. Las representaciones que tienen por objeto resaltar la composición iónica de un agua para permitir compararla con otras aguas son los diagramas en sus diferentes variantes. Son ejemplos los diagramas de Piper, Schoeller, Stiff, Durov, etc (ver referencia 2).

Los diagramas triangulares (Figura 3.1) se utilizan para representar la proporción de tres componentes en la composición de un conjunto o de una sustancia. La suma de los tres componentes debe representar el 100% de la composición de lo que se considera (ver referencia 2).

En hidrogeoquímica se utiliza un triángulo para los cationes principales y otro para los aniones.

El diagrama de Piper (Figura 3.2), está formado por dos triángulos con un rombo que recoge la información de ambos triángulos.

En uno de los triángulos se representan los cationes ($\text{Na}^{++}\text{K}^{+}$ sumados) y en el otro los aniones principales. El paso desde ambos triángulos hasta el rombo es inmediato y muy simple, como se indica en la Figura 3.2. Por tanto, cada análisis queda representado por tres puntos (los dos triángulos y el rombo).

En la Figura 3.2 está representado el análisis de un agua con la siguiente composición:

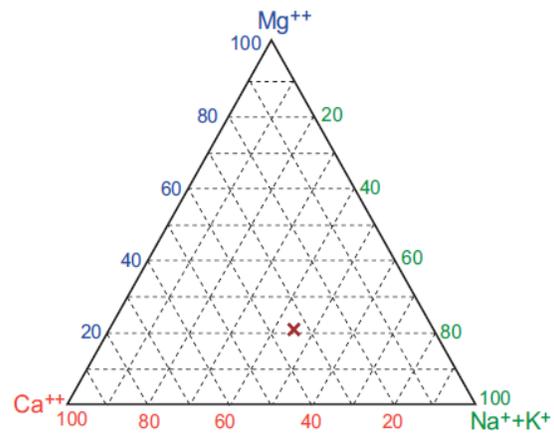


Figura 3.1. Diagrama triangular.

$\text{Ca}^{++} = 60\%$; $\text{Mg}^{++} = 30\%$; $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+} = 10\%$,
 $\text{HCO}_3^{-} = 70\%$; $\text{SO}_4 = 20\%$; $\text{Cl}^{-} = 10\%$

Lógicamente, los datos de partida deben ser meq/L de cada ion, y es preciso calcular los porcentajes de un modo similar al del ejemplo anterior, considerando separadamente:

Σ cationes = 100 (para el triángulo izquierdo).
 Σ aniones = 100 (para el triángulo derecho).

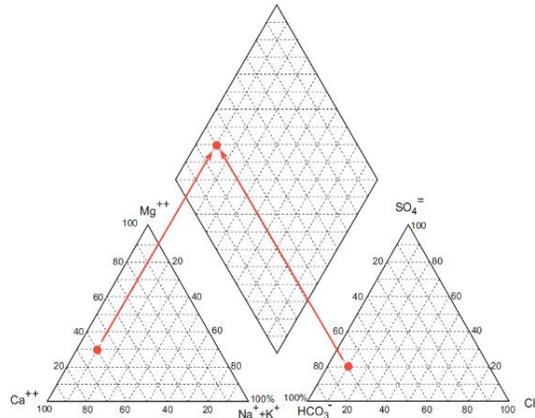


Figura 3.2. Diagrama de Piper.

3.1 Calidad del agua en norias.

La siguiente aplicación fue desarrollada por Arias Paz y Salinas Calleros, mediante un proyecto hidrogeológico-geofísico, y consistió en localizar el mejor sitio para perforar un pozo que abastezca agua de buena calidad a una comunidad.

Una de las principales actividades consistió en el muestreo e interpretación de análisis químicos de agua de 5 norias (pozos someros excavados a mano), que sirvieron para caracterizar las familias de aguas que circulan en el subsuelo de dicha localidad y que sirven como ejemplo práctico de la aplicación de la química a las Ciencias de la Tierra y cuyo enfoque particular está relacionado con la hidrogeoquímica.

Se realizaron análisis químicos de aguas subterráneas que sirvieron para determinar el comportamiento químico de las aguas subterráneas y caracterizar las diferentes familias de agua, de acuerdo con la concentración de los iones mayores predominantes, así como también comparar los resultados con las normas de potabilidad vigentes en México.

Se recopiló, depuró y analizó información relativa a estudios hidrológicos, hidrogeológicos y geofísicos del área de estudio que consideraran a la geología superficial, la geología del subsuelo, la estratigrafía, la tectónica, la climatología, los censos de captaciones de aguas subterráneas, la piezometría, la hidrometría subterránea, la calidad y los balances de aguas subterráneas.

De acuerdo con el estudio geológico de campo, en el entorno de la comunidad de El Palmar, Veracruz, se tiene un conjunto de lomeríos cubiertos de vegetación, cuyas litologías corresponden a depósitos granulares Cenozoicos de la Formación Tuxpan en su miembro inferior, la que se encuentra cubierta en las zonas bajas (en ríos y arroyos) por depósitos fluvio-deltaicos del Cuaternario.

En total se censaron 14 norias y 2 manantiales de los cuales sólo dos cuentan con infraestructura para la extracción de agua potable para los habitantes de ña comunidad antes mencionada.

3.1.1 Sistema Acuífero.

De acuerdo a la litología y la posición del nivel del agua se tiene en el área de estudio, un acuífero local del tipo semiconfinado emplazado en la Formación Tuxpan. Dentro de ésta, la parte permeable corresponde con los depósitos arenosos del miembro inferior siempre que tengan continuidad hidráulica y espesores que garanticen almacenamiento de agua.

3.1.2 Calidad del Agua Subterránea.

Otra de las actividades importantes consistió en la recolección de muestras de aguas subterráneas para su análisis en laboratorio. Los resultados obtenidos indican que la mayoría de los parámetros se encuentran dentro de la Norma de potabilidad NOM-127, salvo el caso de algunas captaciones que sobrepasaron valores sobre todo de coliformes fecales, coliformes totales, sulfatos, fierro, dureza y nitrógeno orgánico.

En la Figura 3.3 se representa el comportamiento espacial de los resultados de análisis químicos de Sólidos Totales Disueltos (STD), donde en general el agua muestreada representa buena calidad con respecto de este parámetro (550 ppm en promedio) salvo el caso de la muestra 1 correspondiente a la noria del centro de la comunidad, que resultó con 2240 mg/l, que según la configuración

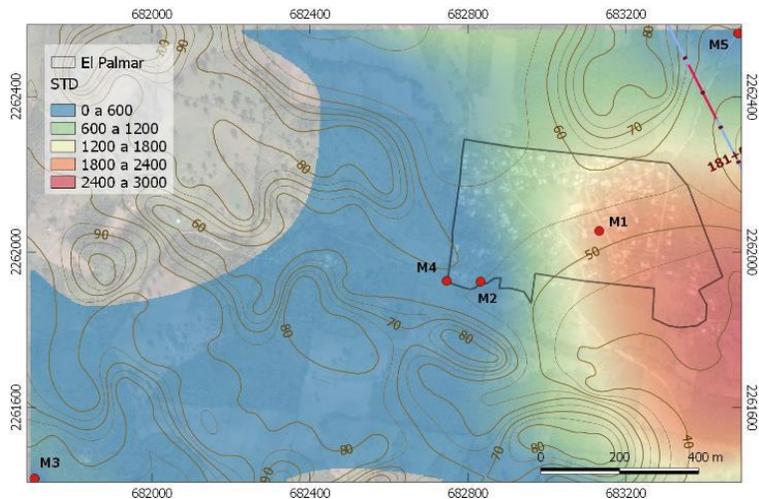


Figura 3.3. Isovalores de Sólidos Totales Disueltos en el agua subterránea.

de isolíneas, existe un aumento hacia la porción suroriente coincidente con el flujo de descarga natural de aguas subterráneas incluso con la concentraciones del ion Sulfato. Los valores mayores de 1000 ppm representan peligro a la salud de acuerdo a la normatividad mexicana.

A continuación, se realiza una breve descripción del comportamiento espacial de algunos parámetros (Tabla 1).

PARÁMETRO	UNIDAD	nom-127-ssa	M1	M2 (1)	M2 (2)	M3	M4	M5
Color real / Color aparente	Upt/Co	20	15/15	10/10	8/-	10/-	30/-	10/-
Olor	-	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	8	Inoloro
Turbiedad	NTU	5	<5	<5	0.35	0.3	0.6	0.45
Sabor	-	Agradable	-	-	Agradable	Agradable	Agradable	Agradable
DBO5	mg/L	-	9.12	7.09	3	3	5	6
DQO	mg/L	-	149.89	117.1	-	-	-	-
Sólidos Totales	mg/L	1000	2240	515	438	400	438	390
Cloruros	mg/L	250	111.67	28.04	27.9	23.5	33.8	17.6
Fluoruros	mg/L	1.5	0.9	0.49	-	-	-	-
Sulfatos	mg/L	400	1933	1735.45	37.8	9.2	28.1	16.1
Aluminio	mg/L	0.2	-	-	0.00906	ND	0.01055	ND
Arsenico	mg/L	0.05	<0.1	<0.01	0.00906	0.00812	ND	0.00794
Cadmio	mg/L	0.005	-	-	ND	ND	ND	ND
Cobre	mg/L	2	<0.05	<0.05	0.01013	0.00821	0.00832	0.00705
Cromo total	mg/L	0.05	<0.05	<0.05	-	-	-	-
Fierro	mg/L	0.3	0.132	0.145	0.06317	0.04356	0.06164	0.6951
Magnesio	mg/L	-	92.6	15.9	7.4	7.3	9.5	7
Manganeso	mg/L	0.15	<0.1	<0.1	0.01026	0.01472	0.03156	0.0437
Mercurio	mg/L	0.001	<0.005	<0.005	ND	ND	ND	ND
Plomo	mg/L	0.025	<0.2	<0.02	ND	ND	ND	ND
Sodio	mg/L	200	157	33.9	34.785	24.615	27.368	18.762
Zinc	mg/L	5	0.062	0.073	0.005	0.00713	0.00332	0.00358
Bario	mg/L	0.7	-	-	0.21937	0.11105	0.0782	0.11604
Cadmio	mg/L	0.005	<0.01	<0.01	ND	ND	ND	ND
Cianuros	mg/L	0.07	-	-	ND	0.0006	0.001	0.0006
SAAM	mg/L	0.5	<0.5	<0.5	0.01	0.01	0.01	0.01
Boro	mg/L	-	0.141	<0.1	-	-	-	-
Potasio	mg/L	-	17.02	1.5	-	-	-	-
Calcio	mg/L	-	493	135	96.9	78.1	77.9	74.6
Acidez	mg/L	-	11.4	13.78	-	-	-	-
Silice	mg/L	-	41.5	28.95	-	-	-	-
Nitrogeno de Nitritos	mg/L	0.05	-	-	0.0034	0.0014	0.0015	0.0007
Nitrógeno de Nitratos	mg/L	10	2.46	0.41	0.2624	0.0077	0.0173	0.0226
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.5	<1	<1	0.0622	0.1038	0.0525	0.1425
Nitrógeno Orgánico	mg/L	0.1	<1	<1	0.2	0.3581	0.5033	0.4024
Dureza Total	mg/L CaCo3	500	1293.6	335.16	364	315	323	313
Dureza de calcio	mg/L CaCo3	-	891.8	292.04	-	-	-	-
Dureza de Magnesio	mg/L CaCo3	-	401.8	43.12	-	-	-	-
Alcalinidad Total	mg/L CaCo3	-	277.2	321.3	345	312	322	299
Bicarbonatos	mg/L CaCo3	-	277.2	321.3	345	312	322	299
Carbonatos	mg/L CaCo3	-	0	0	0	0	0	0
Hidróxidos	mg/L CaCo3	-	0	0	0	0	0	0
Coliformes fecales	NMP/100ml	ND	70	920	>8	>8	>8	>8
Coliformes totales	NMP/100ml	2	70	1600	>8	>8	>8	>8

Tabla 2 Resultados analíticos de agua subterránea de acuerdo al laboratorio ABC

3.1.3 Coliformes Fecales y Coliformes Totales.

Prácticamente todos los análisis practicados resultaron por encima de la norma 127. Dicha norma tiene como finalidad asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas. Para el parámetro de Coliformes Fecales y Coliformes Totales la norma indica un límite permisible de 2 Número más probable/100 ml (NMP/100 ml), por lo que no se garantiza la potabilidad en ese parámetro para toda el agua que se encuentre en el subsuelo de la zona de estudio y sus alrededores. Lo anterior significa que las actividades humanas han impactado desde hace mucho tiempo la calidad natural del agua subterránea y que existe una fuente permanente de este parámetro.

3.1.4 Representación de la Concentración iónica mediante diagramas.

Los resultados de los análisis químicos practicados a 5 norias, fueron capturados y analizados con el apoyo del software especializado denominado AquaChem Versión 3.7, de Waterloo Hydrogeologic, donde indican que las familias de agua corresponden a Cálculo-sulfatadas para las norias M-1 y M-2, cuyos iones predominantes calcio y sulfato han sido tomados de alteración de feldespatos y del cementante de depósitos areno-limosos de la Formación Tuxpan, así como de procesos evaporíticos sulfatados procedentes de minerales con yesos o anhidrita. Un análisis análogo para las norias M-3, M-4 y M-5 ubicados en la Figura 3.3 dieron como resultado que son Cálculo-Bicarbonatadas, cuya firma iónica corresponde con agua que ha estado en contacto también con rocas areno-limosas de la Formación Tuxpan cuyos iones predominantes calcio y bicarbonato ha sido tomado de los feldespatos y de las areniscas y el ion bicarbonato como producto de la disolución de los depósitos de conglomerados cuyos clastos son de roca caliza, así como de su cementante carbonatado (ver referencia 2).

En la Figura 3.4 se presenta el archivo de salida del programa AquaChem en el que se muestran los resultados en los diagramas de Piper, Schoeller, diagrama radial y diagrama de Durov, donde pueden apreciarse las concentraciones iónicas en el agua subterránea analizada en diferentes formatos y a diferentes escalas.

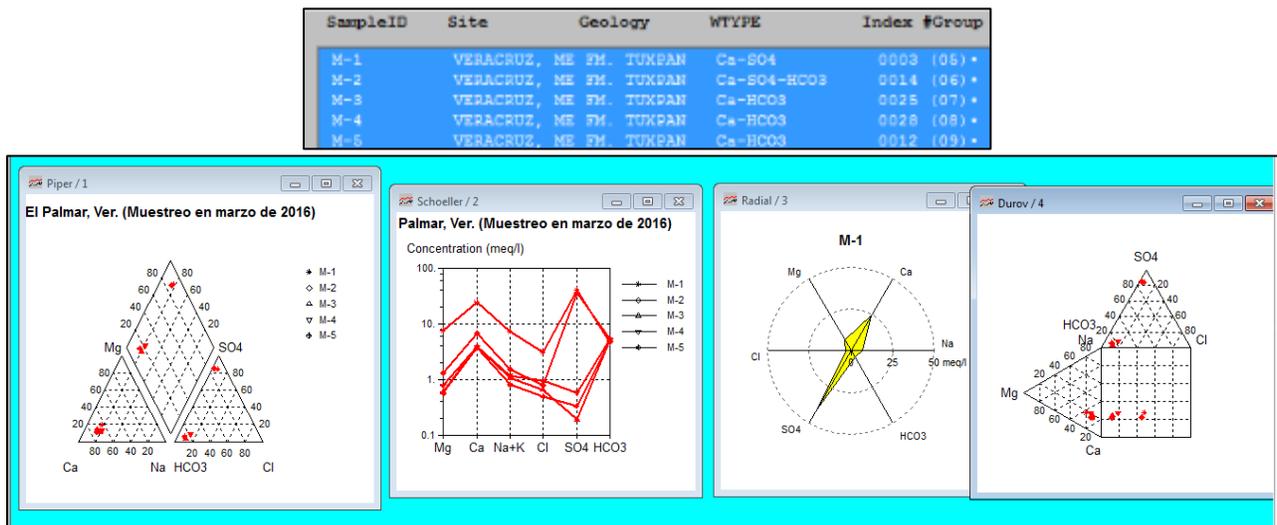


Figura 3.4. Representación de la concentración iónica mediante diagramas.

En cuanto al factor pH, el agua subterránea presenta un promedio de 7.3, lo que significa que es agua ligeramente incrustante. El resultado anterior está influenciado por la presencia del ion carbonato y calcio, asignando una familia de aguas subterráneas cálcica - bicarbonatada. El pH mide la concentración de ácidos que se disocian al estar disueltos en el agua. Un pH mayor a 7 corresponde a un agua alcalina y por lo tanto más incrustante (ver referencia 2).

El agua dulce presenta concentraciones de sulfatos hasta de 150 mg/l, en agua salina asociada al calcio puede alcanzar hasta 5,000 mg/l. La concentración promedio es de 23 mg/l, pero las muestras de M1 y M2 resultaron con alta concentración 1933 y 1735 mg/l respectivamente.

Los pobladores de la comunidad El Palmar, municipio de Papantla Veracruz, presentan dificultades cada vez más severas para resolver los problemas de abasto de agua, incluso para el uso potable, por lo que se busca una solución técnicamente viable.

La ocurrencia de agua subterránea a priori, se ve seriamente afectada debido a la baja porosidad y a la baja permeabilidad de los materiales litológicos del área, considerando que tienen una limitada capacidad de transmitir y almacenar agua subterránea, por lo que las captaciones censadas (norias y manantiales) no son capaces de sustentar un bombeo continuo importante, los manantiales permanentes son de caudal mínimo, de un cuarto a medio litro por segundo.

De forma natural, las norias abaten (se secan) sus niveles en época de estiaje, en época de lluvias la mayor parte de los volúmenes escurren debido a la baja capacidad de infiltración y a la limitada capacidad de almacenaje del medio geológico.

Prácticamente todas las obras de captación presentaron contaminación por coliformes fecales lo que significa que tienen impacto negativo debido a las actividades humanas que han contaminado el acuífero. Es importante señalar que los sulfatos, Nitratos y Fierro resultaron fuera de la norma en algunas de las captaciones.

La interpretación de los análisis químicos mediante diagramas de Piper indican que el agua subterránea corresponde con la familia cálcica – bicarbonatada, apareciendo el ion sulfato únicamente en los resultados del 2016. Lo anterior indica que el flujo subterráneo ha estado en contacto con formaciones geológicas que en el pasado correspondían con ambientes evaporíticos.

3.2 Modelado hidrogeoquímico para recarga gestionada.

A continuación, se presenta otra aplicación a la hidrogeología, la cual fue desarrollada por Antonio Hernández-Espriú, Berenice Zapata-Norberto, Luis Velázquez-Aguirre, Sergio Macías-Medrano y Alonso Soberón, quienes elaboraron un modelado hidrogeoquímico para predecir procesos de mezcla en acuíferos sujetos a recarga gestionada.

La recarga gestionada de acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés, Managed Aquifer Recharge) es una alternativa probada y costo-efectiva, que permite aumentar las reservas de agua subterránea y proporciona protección a acuíferos en estrés hídrico (Ward y Dillon, 2012).

El concepto “MAR” se refiere, en este sentido, a la recarga intencionada de acuíferos para aumentar la disponibilidad en términos volumétricos. Involucra una variedad de métodos para recargar y recuperar agua en acuíferos. La más popular, se basa en inyectar agua a través de un pozo, almacenarla en el acuífero y recuperarla por bombeo, tiempo después, usando el mismo pozo (ASR, Acuífer Storage and Recovery). Una variante del ASR, es inyectar y recuperar el agua almacenada usando diferentes pozos (ASTR, Acuífer Storage Transfer and Recovery), (Dillon, 2002).

La factibilidad de proyectos MAR involucra el análisis de múltiples factores antes de su implementación final. Se evalúa el volumen y tipo de agua fuente, la hidrogeología del acuífero a recargar, los trenes de tratamiento previos a la infiltración y las alteraciones que podría sufrir la calidad del agua nativa del acuífero, al mezclarse con una fuente ajena al medio. Para este último punto, se utilizan herramientas hidrogeoquímicas que permitan evaluar y predecir reacciones entre el agua fuente y el agua subterránea de fondo.

La modelación hidrogeoquímica permite evaluar procesos de mezcla, especiación química, índices de saturación y transporte reactivo entre diferentes componentes. Por esta razón, el modelado hidrogeoquímico es una herramienta ideal para estudiar la factibilidad de un proyecto MAR, desde el punto de vista de las reacciones y procesos que podrían esperarse entre el agua subterránea nativa (natural) y el agua fuente (ajena al medio) que se usará para recargar.

El objetivo de la investigación realizada por los autores antes citados se centra en establecer la compatibilidad hidrogeoquímica entre el agua subterránea nativa y el agua de salida de una planta de tratamiento terciario (PTAR), que se usará para recargar un sector del acuífero en la porción sur de la Cuenca de México. Para ello se desarrollaron un modelo hidrogeoquímico en PHREEQC (herramienta computacional para aplicaciones hidrogeoquímicas de especiación, reacciones de columna, transporte 1D y modelado geoquímico inverso) que permitió predecir las reacciones y procesos de mezcla entre la composición de fondo del acuífero y el agua de salida de la PTAR, que recargará el acuífero a través de un sistema ASTR.

Se analizó la confiabilidad de los datos, estimando el error analítico por medio de un balance eléctrico entre aniones y cationes (Merkel y Planer-Friedrich, 2008), con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Cationes} - |\sum_{i=1}^n \text{Aniones}|}{\sum_{i=1}^n \text{Cationes} + |\sum_{i=1}^n \text{Aniones}|} \cdot 200 \quad (1)$$

Donde E (%) es el error del análisis.

La composición química de las muestras se expresó gráficamente usando el diagrama ternario de Piper y los polígonos de Stiff para establecer variaciones composicionales y facies hidroquímicas. Para ello, las concentraciones de los iones mayoritarios se transformaron de mg/l a miliequivalentes/l [meq/l].

En PHREEQC se estructuró un código donde se simularon numéricamente las mezclas a diferentes proporciones con objeto de: (1) estimar la composición de fondo del acuífero mezclando la hidrogeoquímica composicional de los pozos, y (2) simular mezclas entre la composición de fondo del acuífero y el agua tratada.

Se simularon índices de saturación (SI), con objeto de estudiar las fases minerales del acuífero que tenderán a precipitarse o disolverse, como producto de las posibles reacciones geoquímicas entre el agua de salida de la PTAR y el agua subterránea nativa.

Está reportado que si el $SI < 0$, la mezcla tenderá a disolver el mineral. Si el $SI > 0$, la mezcla tenderá a precipitar esa fase sólida. Se analizaron los SI esperados entre las mezclas simuladas y las siguientes fases minerales: anhidrita, barita, calcita, celestita, dolomita, goethita, yeso, halita, hematita, magnesita, periclasa, pirolusita, cuarzo y siderita.

De acuerdo con los polígonos de Stiff, se muestran composiciones magnésicas-bicarbonatadas, y una tendencia sódica-bicarbonatada. En este sentido, la simulación de la mezcla demuestra que la composición de fondo del acuífero, tiene una firma hidrogeoquímica magnésica-bicarbonatada.

También es claro que el agua tratada está muy poco mineralizada y exhibe una tendencia sódica-clorurada. Por ende, el agua fuente difiere de la hidrogeoquímica natural del acuífero, en composición y concentración.

De acuerdo al modelo de simulación realizada por los autores antes indicados, la composición de mayor compatibilidad se podría esperar si la mezcla entre la composición natural del acuífero y el agua de la salida de la PTAR, se da a una proporción de 9 partes del acuífero por una parte de la PTAR, es decir, 90%-10%. A medida que la influencia de la PTAR sea mayor, el agua de mezcla tenderá a perder contenido iónico.

En hidrogeoquímica, las concentraciones bajas se asocian con una buena calidad del agua (Martínez-Alfaro, et al. 2006), excepto en casos donde las aguas mineralizadas representan el objeto de un estudio o proyecto en particular (ver referencia 9). Bajo esta consideración, podría sugerirse que la influencia del agua de salida de la PTAR, está sobretratada y su bajo contenido mineralizante genera procesos de dilución, mejorando la calidad química del acuífero.

En la investigación de Xanke et al. (2015) se reporta que el agua subterránea del acuífero Wala (Jordán) ha mostrado fluctuaciones en la salinidad debida a cambios temporales en la concentración del ion cloruro, durante 10 años de operación de un sistema MAR, basado en la inyección de aguas pluviales y residuales tratadas, a través de lagunas de infiltración y pozos ASR. Los cambios en la salinidad responden a variaciones de la recarga natural, tasas de extracción, heterogeneidades hidráulicas y fluctuaciones del gradiente (ver referencia 9).

Los índices de saturación se analizaron simulando una reacción entre 10 moles de minerales (sulfatos, carbonatos, evaporitas y óxidos) y 1 litro de las mezclas. PHREEQC calcula un cambio o diferencial (δ -mol) entre los 10 moles de entrada y los moles finales producidos durante la reacción. Si δ -mol es positivo, la mezcla tenderá a precipitar ese mineral y viceversa.

Los resultados mostraron que los minerales con tendencia a precipitar serán la anhidrita (CaSO_4), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), hematita (Fe_2O_3) y pirolusita (MnO_2). Por otro lado, las mezclas tenderán a disolver calcita (CaCO_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halita (NaCl), magnesita (MgCO_3), periclasa (MgO) y siderita (FeCO_3).

El agua nativa del acuífero y las mezclas simuladas tienden a disolver carbonatos y óxidos, exceptuando la hematita y pirolusita. Esto sugiere que tanto el agua de mezcla como la composición de fondo tienden a la corrosividad.

Los resultados a los que llegaron los autores de esta aplicación, indican que la firma hidrogeoquímica natural del acuífero ($\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$) no se modifica cuando se mezcla con el agua de salida de una planta terciaria, en ninguna de las proporciones simuladas. De hecho, la influencia del agua fuente genera dilución en el agua subterránea nativa, disminuyendo las concentraciones de los iones mayoritarios, al menos en condiciones estáticas. Esto indica que el agua seguirá siendo apta para consumo humano, ya que cumplirían con la norma 127 sobre la calidad del agua potable.

El agua subterránea en la zona de estudio es naturalmente corrosiva, y se espera que las mezclas con el agua fuente también lo sean.

3.3 Discusión.

La interpretación de los análisis químicos permite conocer la calidad del agua de una noria, de un pozo o de un acuífero. Si se utilizan los diagramas de Piper se puede conocer si el agua de un acuífero es o no potable como el caso del agua subterránea de la comunidad de El Palmar, Veracruz, la correspondiente con la familia cálcica – bicarbonatada con contenido de contaminantes orgánicos.

Prácticamente todas las obras de captación de agua subterránea de la comunidad del Palmar, Veracruz, presentaron contaminación por coliformes fecales, lo que significa que tienen impacto negativo debido a las actividades humanas que han contaminado el acuífero principalmente por basura y por el mal diseño de fosas sépticas.

En cuanto al factor pH, el agua subterránea presenta un promedio de 7.3, lo que significa que es agua ligeramente incrustante, que pertenece a la familia de aguas subterráneas cálcica - bicarbonatada.

Por otra parte, la modelación hidrogeoquímica representa una herramienta útil, y sencilla, que permite evaluar, los procesos hidrogeoquímicos más relevantes que podrán esperarse en proyectos de recarga gestionada de acuíferos, teniendo en el caso de investigación desarrollado en este trabajo que la firma hidrogeoquímica natural del acuífero ($\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$), no se modifica cuando se mezcla con el agua de salida de una planta de tratamiento.

IV.- Aplicaciones a la Minería.

Uno de los grandes retos a los que la minería se ha enfrentado tiene que ver con la forma como explotamos los materiales sólidos de la corteza terrestres que son necesarios para la vida del hombre.

En la antigüedad se utilizaba el fuego o agua para desprender o fragmentar las rocas que contenían sustancias de interés para las personas. El inconveniente de estos métodos tiene que ver con la productividad. Se requieren grandes cantidades de tiempo para poder obtener tan sólo algunos cuantos materiales fragmentados.

En la actualidad, el hombre encontró en la Química una gran solución a sus problemas, siendo los explosivos los que son utilizados en la minería y que permiten explotar los recursos que tienen las rocas de forma eficiente y en menor tiempo.

Un explosivo es aquella sustancia que por alguna causa externa (roce, calor, percusión, etc.) se transforma en gases; liberando calor, presión o radiación en un tiempo muy breve.

El primer explosivo utilizado en la industria minera fue la pólvora y su composición más popular consiste en 75% de nitrato de potasio (KNO_3), 15% de carbono (C) y 10% de azufre (S) en porcentajes de masa.

Posteriormente, la nitroglicerina ($\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$) fue descubierta por el químico italiano Ascanio Sobrero en 1847, y en 1867 el químico Alfred Nobel (1833-1896) creó la dinamita al absorber la nitroglicerina en una materia porosa e inerte (como el sílice, el polvo de ladrillo, la arcilla seca, el yeso, el carbón, etc.).

La nitroglicerina fue el primer explosivo práctico con mayor potencia que la pólvora negra, mientras que la dinamita, al ser un explosivo más estable, sustituyó rápidamente a la nitroglicerina para aplicaciones industriales, en la minería y en el armamento militar.

También la Química y la Minería están relacionadas en el tratamiento de aguas de refrigeración, residuales e industriales, ya se tienen procesos útiles en la extracción del mineral de importancia económica, como ocurre con la disolución con ácido sulfúrico (H_2SO_4) o en el caso del oro por lixiviación con cianuro (CN^-), en el tratamiento superficial en los minerales sulfurados para poder flotar lo útil y separarlo de la materia estéril o relave.

Los concentrados obtenidos de minerales tienen que ser purificados para obtener el metal puro, para lo cual se utilizan procesos químicos en la fundición y electrorefinación. Los gases de la fundición que contienen principalmente dióxido de azufre (SO_2) son tratados químicamente para transformar el SO_2 en SO_3 , recuperándolo finalmente como ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Uno de los problemas más serios al que se enfrenta la industria minera en la actualidad, en cuestión ambiental y relacionado con la Química, es el drenaje ácido de mina (DAM), ya que la acidez del agua y la elevada concentración de metales en solución puede causar la afectación de cuerpos superficiales de agua, acuíferos, suelos, rocas y sedimentos; o bien pueden ocasionar daño directo en seres vivos (Sengupta, 1993; Younger et al., 2002). La generación del drenaje ácido se debe a un fenómeno natural que se presenta en las minas o en los depósitos de residuos mineros, como jales o terreros, cuando se produce la oxidación de los sulfuros minerales (ver referencia 20).

En presencia de agua y oxígeno se llevan a cabo reacciones de óxido-reducción en las que se oxida el azufre de los minerales para formar sulfatos (SO_4^{2-}) y liberar protones (H^+) que dan la acidez al agua (Blowes et al., 2004). El DAM se caracteriza por tener $\text{pH} < 5$, su alto contenido de sólidos suspendidos, así como por presentar en solución metales pesados, metaloides y sulfatos.

El riesgo que representa para el ambiente radica en que su proceso de generación puede durar hasta cientos de años y resulta complicado su control una vez que se concluyen las operaciones en las minas.

4.1 Los explosivos en la minería.

La siguiente aplicación fue elaborada por Gabriel Ramírez Figueroa, cuyos elementos y características principales se presentan a continuación.

Los explosivos se clasifican como “detonantes” cuya reacción se autoabastece por una onda de choque, supersónica (en el medio que recorre), que inicia al explosivo a medida que esta transcurre. Dada la alta velocidad de la reacción son explosivos muy potentes. Dentro de esta clase se pueden incluir las siguientes subclases: explosivos primarios, secundarios y terciarios. También se les clasifica como: a) iniciadores (o detonadores), b) carga o masa que explotará y c) multiplicadores (ver referencia 17).

Uno de los explosivos de mayor uso en la minería (de tipo terciario y/o de carga) es el ANFO, acrónimo que en idioma inglés significa Ammonium Nitrate - Fuel Oil. Consiste en una mezcla de nitrato de amonio (NH_4NO_3) y un combustible derivado del petróleo de bajo costo (la traducción directa de fuel oil en México es diesel).

El calor es una manifestación de la energía, la Termoquímica, rama de la físicoquímica trata de los cambios térmicos asociados a las transformaciones químicas y físicas de la materia. Se utiliza en el diseño de una voladura. El balance de oxígeno de los explosivos puede ser cubierto con base en sus propiedades físicoquímicas (ver referencia 17).

Durante una explosión, la reacción química produce una zona de detonación que se propaga a través de la carga explosiva, así como hacia la roca circundante.

La mayor parte de los componentes de un explosivo están compuestos por los elementos químicos oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y carbono, junto con algunos elementos metálicos como el aluminio, magnesio, sodio, calcio, etc.

Tomando en cuenta que la reacción debe oxidar todos los combustibles en él contenidos, el balance de oxígeno resulta vital por lo que la mezcla debe tener suficiente oxígeno para completar la reacción, pero no tanto como para reaccionar con el nitrógeno.

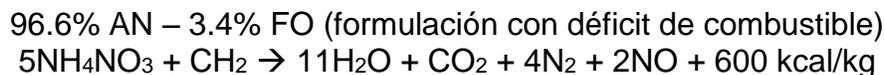
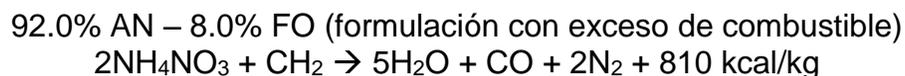
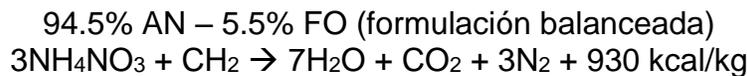
Con un balance “cero” de oxígeno, los productos teóricos de la detonación, todos en forma gaseosa e inofensiva, son el agua, dióxido de carbono y nitrógeno. De hecho, también se generan otro tipo de gases en pequeñas cantidades tales como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, metano y otros en menor volumen. Así que cualquier desviación al balance de oxígeno permite la creación de una mayor cantidad de estos gases tóxicos e indeseables.

De acuerdo con Hartman (2002), una reacción balanceada en oxígeno que sólo involucre el oxígeno, hidrógeno y carbono puede escribirse de la siguiente manera:

$$\text{Balance de oxígeno} = O_0 - 2CO_2 - H_2O = 0$$

En caso de que algún metal o cualquier otro elemento reactivo se encuentre presente, entonces, al calcular el balance, se debe contar con suficiente oxígeno para formar los óxidos de dichos elementos (por ejemplo, Al_2O_3 , MgO , Na_2O , CaO).

En el caso del ANFO, la detonación de tres mezclas con diferentes proporciones se ilustra de la siguiente manera:



En cada caso, la energía liberada se obtiene al calcular la diferencia en los calores de formación tanto de los ingredientes como de los productos. Las consecuencias de contar con un balance de oxígeno son evidentes, se forman diferentes productos y cantidades, pero el mayor impacto se tiene en la reducción de la energía liberada.

En la industria minera, la mezcla que generalmente se utiliza es de 94% de nitrato de amonio y 6% de diésel, con lo que se asegura un ligero exceso de combustible que provoca un pequeño desbalance en el oxígeno como medida de seguridad (los óxidos nitrosos son más tóxicos que el monóxido de carbono) (ver referencia 17).

De esta manera, el hombre encontró en la Química una gran solución a sus problemas de explotar canteras y yacimientos minerales para disgregar la roca con en los explosivos, de tal manera que se tienen procedimientos seguros y de gran utilidad para la minería.

4.2 Sistemas de tratamiento de Drenaje Ácido de Mina.

El estudio de la teoría de drenaje ácido lo realizó Santos Jallath con los aspectos teórico de la geoquímica que ocurre en la generación del DAM y en su tratamiento con rocas carbonatadas.

Como se mencionó anteriormente la generación de drenaje ácido tanto en obras mineras como en depósitos de residuos de mina se ha convertido en una problemática ambiental en la industria minera. Esto ha obligado al desarrollo de sistemas de tratamiento, que de manera general, se clasifican en activos y pasivos.

Básicamente los sistemas activos requieren del uso de algún reactivo alcalino que permita elevar el pH de la solución y con ello remover los elementos traza por precipitación. Principalmente se han utilizado carbonato de calcio, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, óxido de calcio e hidróxido de calcio. Generalmente se usan en las minas cuando aún están en operación ya que resultan sencillos y prácticos y los costos de inversión, operación y mantenimiento pueden ser absorbidos por las ganancias que se tienen de la operación misma (ver referencia 20).

Los elementos traza de las minas abandonadas pueden repercutir en los acuíferos una vez que las minas quedan fuera de operación; adquiriendo los tratamientos pasivos mayor importancia debido a que, a mediano y largo plazo, resultan más eficientes y de menor costo comparados con los activos.

Los tratamientos pasivos son sistemas que utilizan materiales naturales para promover procesos químicos, físicos y biológicos que permiten la depuración de aguas contaminadas.

La característica de los tratamientos pasivos es que utilizan materiales naturales, como rocas carbonatadas, plantas de diferentes géneros, materia orgánica y/o microorganismos. En este tipo de sistemas ocurren una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que permiten neutralizar el agua y remover los metales y metaloides contenidos en solución.

Entre los tratamientos pasivos que más se han aplicado están aquellos que utilizan rocas con minerales carbonatados que de manera natural consumen la acidez del agua; por ejemplo, calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$) o magnesita (MgCO_3) (ver referencia 20).

La roca caliza, por su alto contenido de calcita y su abundancia en algunos ambientes geológicos, ha sido ampliamente utilizada. La disolución de la calcita produce iones bicarbonato (HCO_3^-) o ácido carbónico (H_2CO_3), según las condiciones del medio, ligeramente ácidas a alcalinas o fuertemente ácidas.

Esta disolución depende fuertemente de la presencia o ausencia de dióxido de carbono (Younger et al., 2002). En sistemas abiertos donde la calcita está en contacto con el CO₂ de la atmósfera, la disolución de la calcita se incrementa, por lo que ocurre hay mayor producción de bicarbonatos y, por tanto, mayor consumo de iones hidrógeno presentes en el DAM.

Por otro lado, la movilidad de los metales en solución presentes en el DAM, está regida principalmente por el pH y las condiciones oxidantes o reductoras del medio (ver referencia 20). Las variaciones de pH determinan si un elemento puede estar en solución (forma acuosa) o bien precipitar en forma de hidróxido, de carbonato, de sulfuro; o no precipitar y quedar retenido por algún fenómeno de adsorción sobre la superficie de un mineral secundario formado en el proceso de oxidación.

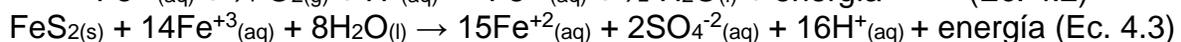
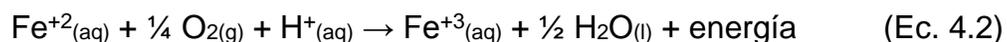
En las minas donde hay presencia de minerales con sulfuros metálicos, es posible que se genere drenaje ácido debido a la oxidación de estos compuestos en las obras mineras o en los depósitos de residuos. Los minerales que más favorecen la generación de DAM por su reactividad son los sulfuros de hierro, pirita (FeS₂), marcasita (FeS₂) y pirrotita (Fe_{1-x}S); sin embargo, otros minerales son menos reactivos pero también sufren el proceso de oxidación, tal es el caso de la calcopirita (CuFeS₂), bornita (Cu₃FeS₄), arsenopirita (FeAsS) y esfalerita rica en hierro ((Zn,Fe)S).

El DAM se caracteriza por su acidez (pH<5), su alto contenido de sólidos suspendidos, así como por presentar en solución sales (CE > 6 mS), metales pesados (>10 mg/L), metaloides (>5 mg/L) y sulfatos (>1,000 mg/L); así como por la presencia de microorganismos.

La pirita es el mineral más ampliamente estudiado dada su abundancia en los depósitos de mineral (como mineral asociado) y por su alta reactividad a la oxidación (ver referencia 20); de hecho, se considera el principal generador de DAM. La oxidación de la pirita ocurre cuando la superficie del mineral queda expuesta al oxígeno y al agua, y en una primera etapa predominan las reacciones de oxidación química:

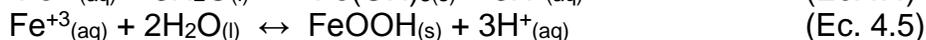
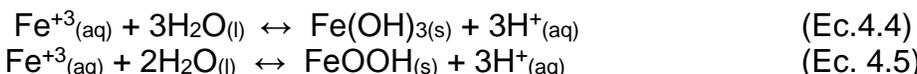


La reacción produce ion ferroso (Fe⁺²) en solución, sulfatos que aumentan los sólidos disueltos totales, e iones hidrógeno que acidifican el agua (Ec. 4.1). El ion ferroso a su vez se oxida a ion férrico (Ec. 4.2), el cual también actúa como agente para oxidar la pirita y producir más ion ferroso, sulfatos e iones hidrógeno (Ec. 4.3).



La abundancia del Fe⁺³ es dependiente del pH de la solución; su solubilidad es muy baja a valores neutros y alcalinos de pH, por lo que su presencia predomina a pH ácido. La concentración de Fe⁺³ disuelto en agua ácida disminuye conforme

aumenta el pH y su solubilidad está controlada por la precipitación de hidróxidos férricos (Fe(OH)₃) y oxihidróxidos (FeOOH) (Lottermoser, 2007).



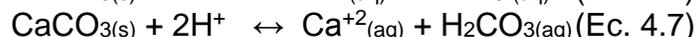
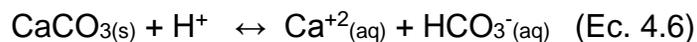
La precipitación de los hidróxidos y oxihidróxidos es una reacción de hidrólisis que también libera iones hidrógenos, lo que ocasiona la caída del pH.

La oxidación química disminuye lentamente el pH y a valores inferiores a 4 la actividad de los microorganismos predomina en el proceso de oxidación y éste se acelera en miles de veces respecto a la velocidad de la oxidación química (ver referencia 20).

Sin embargo, la oxidación de los sulfuros no siempre produce DAM, ya que la presencia de algunos minerales en la roca produce reacciones que neutralizan la acidez (reacciones amortiguadoras) mediante el consumo de iones H⁺. Entre los minerales que tienen capacidad amortiguadora predominan por su abundancia en la corteza terrestre los silicatos (principalmente aluminosilicatos), los carbonatos y los hidróxidos (ver referencia 20).

Los carbonatos juegan un papel más importante que los silicatos en el proceso de neutralización del drenaje ácido; minerales como calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)), anquerita (Ca(Fe,Mg)(CO₃)₂) o magnesita (MgCO₃) son consumidores de la acidez del agua (Blowes *et al.*, 2004; Lottermoser, 2007). El más importante de ellos es sin duda la calcita por su abundancia en diversos ambientes geológicos y a su velocidad de disolución comparada con los otros carbonatos.

La disolución de la calcita produce iones bicarbonato (HCO₃⁻) o ácido carbónico (H₂CO₃), según las condiciones del medio, ligeramente ácidas a alcalinas o fuertemente ácidas, respectivamente:



La disolución de la calcita depende fuertemente de la presencia o ausencia de dióxido de carbono, propiamente si el agua está en contacto con la fase gaseosa.

El tratamiento con rocas calcáreas son sistemas simples y consisten en canales que están empacados con rocas carbonatadas; entre éstos destacan dos tipos de sistemas, los canales anóxicos de caliza (CAnC) y los canales abiertos de caliza (CAbC), la diferencia entre ellos es que el primero es un sistema cerrado mientras que el segundo es abierto (Younger *et al.*, 2002; López *et al.*, 2002).

En los CAnC los huecos formados entre la roca son ocupados por el drenaje ácido y esto permite que se mantengan las condiciones anóxicas, por lo que el Fe⁺² se

mantiene en su forma reducida y no se produce el precipitado de hidróxidos de hierro que recubre la roca.

La movilidad de los elementos traza, llamando así a los metales pesados y metaloides que pueden estar presentes en solución en un drenaje ácido, está regida principalmente por el pH de la solución (ver referencia 20); y quizá éste sea el parámetro clave para entender el proceso de liberación de dichos elementos y determinar los mecanismos de retención para removerlos de la solución en un sistema de tratamiento.

Las variaciones de pH determinan si un elemento puede estar en solución (forma acuosa) o bien precipitar en forma de hidróxido, de carbonato, de sulfuro; o no precipitar y quedar retenidos por algún fenómeno de adsorción, co-precipitación o intercambio catiónico sobre la superficie de un mineral secundario formado en el proceso de oxidación, particularmente en los hidróxidos de hierro.

Dependiendo del pH y de las condiciones oxidantes o reductoras del medio (Redox), un elemento podrá precipitar en forma de óxido, hidróxido o carbonato; o bien permanecer en forma soluble. En este sentido los diagramas de Pourbaix que relacionan el Eh (potencial óxido-reducción) con el pH, ayudan a comprender el comportamiento de los elementos traza en la solución cuando varían estas condiciones.

Por ejemplo, en la Figura 4.1 se muestran los diagramas Eh-pH para el aluminio y el hierro que son dos elementos que comúnmente están presentes en el drenaje ácido.

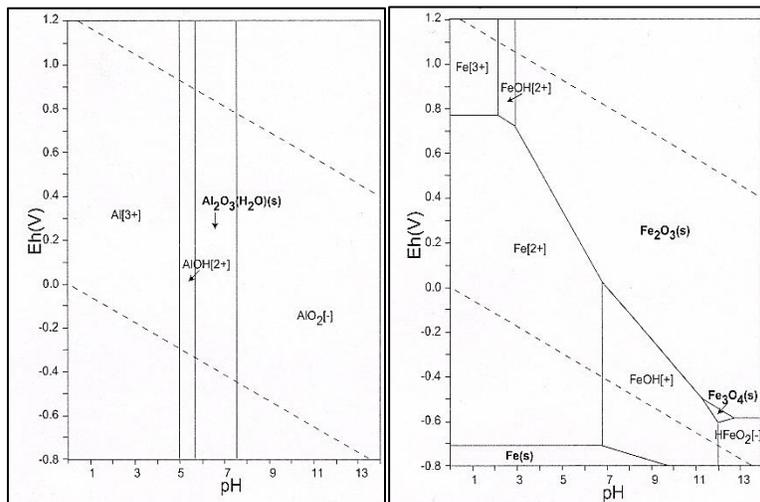


Figura 4.1. Diagramas de Pourbaix (pH-Eh) para aluminio y hierro.

En el caso del aluminio se encuentra como Al^{+3} en solución a valores de pH menores a 5 y principalmente en condiciones oxidantes; al aumentar el pH en un intervalo entre 5.4 y 7.3 precipita como hidróxido en condiciones oxidantes e incluso en reductoras. El caso del Fe es similar, en condiciones ácidas y fuertemente oxidantes se encuentra principalmente en solución como Fe^{+2} y

Fe^{+3} , a valores de pH mayores a 3 comienza a precipitar como hidróxido y conforme aumenta el pH forma óxidos de hierro, tanto en condiciones oxidantes como reductoras. En condiciones fuertemente reductoras el Fe se encuentra como sulfuros en un intervalo de pH de ácido a neutro.

El tratamiento de un drenaje ácido en primera instancia tiene como objetivo elevar el pH del agua y posteriormente remover los metales y metaloides en solución. Tanto en los tratamientos activos como en los pasivos, la remoción de los elementos traza se da principalmente por procesos químicos de precipitación que ocurren cuando aumenta la alcalinidad de la solución y, por tanto, aumenta el pH.

La remoción de elementos que comúnmente están presentes en el drenaje ácido, como el aluminio, arsénico, cadmio, cobre, hierro, manganeso y zinc, entre otros posibles, puede darse por procesos químicos de precipitación y esto ocurre con el incremento del pH.

El aluminio se encuentra en altas concentraciones como Al^{+3} a $\text{pH} < 4$ y es importante su remoción ya que es un elemento altamente ecotóxico en su forma acuosa. A valores mayores de $\text{pH} > 4$ el Al precipita mediante hidrólisis como hidróxidos e hidroxisulfatos en forma sólida (Younger *et al.*, 2002):



A valores suficientemente altos de pH (5 a 8), el Al precipita tanto en condiciones oxidantes como reductoras. El hidróxido de aluminio generalmente es amorfo pero lentamente cristaliza a una de las variedades más estables que es la gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) o la bohemita ($\text{AlO}(\text{OH})$).

El Fe se elimina por oxidación aerobia en forma de oxihidróxidos a partir de la formación del ion férrico (Fe^{+3}), el cual se encuentra mayormente en solución a pH menores a 4. Al igual que el Al, el ion férrico hidroliza para precipitar como hidróxido y oxihidróxido:



En condiciones neutras (pH entre 6 y 8) se forman hidróxidos amorfos de hierro y goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), pero a valores mayores a 8 es más común encontrar precipitados de ferrihidrita ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Sin embargo, también se reporta que a valores menores de pH se puede dar la sustitución del radical OH^- por sulfato (SO_4^{-2}) y formar oxihidroxisulfatos como la schwartmannita ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_n\text{-nH}_2\text{O}$). Con el tiempo los hidróxidos de hierro pierden agua y gradualmente recristalizan para formar hematita (Fe_2O_3).

La precipitación de hidróxidos y oxihidróxidos de Fe y Al a partir de la neutralización del drenaje ácido contribuye a la remoción de metales en solución (Mn, Cu, Co, Ni y Zn) mediante procesos de adsorción o coprecipitación.

Romero *et al.* (2007) identifican la formación de fases secundarias como yeso, goethita, hematita y k-jarosita formando una capa cementante en la zona de oxidación de depósitos de jales, y determinan que ésta juega un papel importante

en la inmovilización de Zn, Cd, Cu y As mediante procesos de adsorción y coprecipitación en la superficie de los precipitados de Fe.

La disolución de la calcita se aprovecha para elevar el pH, consumir la acidez y producir alcalinidad mediante la liberación de iones bicarbonato. Sin embargo, se ve limitada por el recubrimiento de la superficie de la roca ya que sobre ella se depositan los hidróxidos y oxihidróxidos metálicos que se forman en la neutralización, principalmente los de hierro (ver referencia 20).

Pese a que el recubrimiento de la superficie de la roca limita la disolución de la caliza, hay evidencias que aun así las rocas conservan cierta capacidad para seguir aportando alcalinidad.

Aun cuando la precipitación de hidróxidos y oxihidróxidos de hierro pueden ser una limitante en los sistemas de tratamiento abiertos (con ambientes oxidantes), es posible que estos sistemas puedan tener un buen rendimiento (en términos de su capacidad de neutralización y su vida útil), siempre que sea posible mantener en suspensión dichos precipitados y evitar así la saturación de los huecos entre la roca.

4.2.1 Neutralización de Drenaje Ácido de Mina en México.

A continuación, se presenta otra aplicación, la cual fue desarrollada por José Enrique Santos Jallath, cuyo objetivo es crear un sistema de tratamiento en celdas con el uso de rocas carbonatadas, que permita la neutralización del drenaje ácido que se genera en una Mina de México en la que se explota un yacimiento de sulfuros masivos de tipo vulcano-sedimentario de Zn- Pb-Cu con valores de Ag y Au.

La mineralización del yacimiento está constituida por sulfuros, el más abundante es la pirita (FeS_2) y representa el 78% de los sulfuros. La esfalerita (FeS) es el principal mineral de mena y representa el 12%, la galena (PbS) el 2.1 % y la calcopirita (CuFeS_2) es el mineral menos abundante entre los sulfuros.

En la geología local afloran principalmente rocas jóvenes del cuaternario; andesitas basálticas, basaltos de olivino y depósitos lacustres. Las rocas que cubren al yacimiento de mineral son la filita gráfita y el esquisto de clorita y de sericita. En una zona cercana a la mina, hay un afloramiento de roca caliza.

El alto contenido de pirita en el yacimiento, así como la presencia de agua en la región, favorecen la formación de drenaje ácido dentro de la mina.

Actualmente, el DAM escurre hacia una planta de tratamiento instalada dentro de la mina donde se neutraliza con carbonato de sodio para utilizar el agua posteriormente en el proceso.

La presencia de roca filita gráfita asociada al yacimiento, con importante contenido de calcita (CaCO_3), así como de roca caliza que aflora cerca de la mina, hacen posible considerar su uso en un sistema de tratamiento pasivo, que permita

controlar el drenaje ácido a un bajo costo y con requerimientos mínimos de mantenimiento.

Se identificaron los sitios donde se genera DAM mediante recorridos por la mina, cuantificando el caudal de DAM que se produce en cada sitio, se tomaron muestras de DAM y de roca para su caracterización.

Se caracterizó el DAM haciendo la determinación de pH, conductividad eléctrica, acidez neta, elementos traza (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sr, Ti, Tl, V y Zn). Determinación de iones mayores (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{-2} y HCO_3^-).

Se caracterizó la roca determinando la composición química mediante fluorescencia de rayos X (iones mayores y elementos traza). La composición mineralógica primero mediante un estudio petrográfico y posteriormente por difracción de rayos X.

En los recorridos que se hicieron en la mina se identificaron once sitios donde se genera DAM. Los valores de pH que se midieron directamente en los sitios van de 2.43 a 3.05. Se tomaron cuatro muestras de DAM en diferentes lugares para su caracterización. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Concentración de elementos traza en las muestras de drenaje ácido.

Muestra	pH	EC (mS)	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Si	Zn
			mg/L						
Arroyo	7.38	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	9.25	<LD
DA 6	2.44	11.31	41.0	5.8	11.6	562.9	41.1	35.4	482.9
DA 6 - A	2.53	8.02	36.4	5.1	12.1	527.1	37.0	32.0	470.6
Pileta	2.90	4.72	8.6	2.3	2.5	178.4	25.8	16.6	363.3
DA 8	3.38	1.87	<LD	0.2	<LD	0.3	3.8	8.0	77.1

LD (mg/L): Al (0.08), Cd (0.02), Cu (0.12), Fe (0.01), Mn (0.01), Si (0.01) y Zn (0.01)

Por su nivel de pH, el agua puede considerarse como fuertemente ácida y la alta conductividad eléctrica refleja un elevado contenido de metales en solución. Los elementos trazas que están en concentraciones significativas son el Al, Fe, Cu, Cd, Mn y Zn, comparadas con valores del agua natural en la zona (Arroyo), y por tanto serán el objeto del sistema de tratamiento.

Los resultados del análisis de iones mayores indican que el Na^+ se presenta de 113.64 a 354.46 mg/L, el K^+ de 3.5 a 20.98 mg/L, Ca^{+2} de 251.97 a 437.94 mg/L, Mg^{+2} de 379.59 a 1,673.51 mg/L y SO_4^{-2} de 2,896.47 a 16,555.29 mg/L.

Se tomaron seis muestras de roca dentro de la mina, tres de roca filita gráfita y tres de esquisto de sericitia. Y fuera de la mina se tomó una muestra de roca caliza.

En la roca caliza la matriz es calcárea (calcita), con cuarzo, plagioclasas, muscovita, wollastonita y minerales opacos. En la filita gráfita se identificó calcita, plagioclasa, biotita, cuarzo y minerales opacos. Finalmente, en el esquisto se encontraron cuarzo, muscovita, plagioclasa, calcita, óxidos de hierro y minerales opacos.

La determinación del potencial de las rocas para neutralizar el drenaje ácido se inició con pruebas de titulación ácido-base. La caliza dio 850 kg de CaCO_3 /ton de roca, la filita F1 575 kg de CaCO_3 /ton y la filita F2 300 kg de CaCO_3 /ton. También se hizo una titulación de drenaje ácido. Con el NaOH consumido se calculó la cantidad de roca necesaria para neutralizar 1 L de DAM a $\text{pH}=7$; de caliza se requieren 6.55 g, de filita F1 10.09 g y de filita F2 19.33g.

Se realizaron pruebas de agitación en matraces. Se utilizaron tres tamaños de roca: 2.00 mm, 2.36 mm y 3.35 mm; tres relaciones roca/DAM: 1/20, 1/10 y 1/5; y tres tiempos de agitación: 18, 24 y 36 horas. En todos los casos en los que se utilizó la filita y caliza se logró incrementar el pH inicial de la solución (2.58 – 2.91) a valores neutros o cercanos al neutro (5.36 – 7.96). Con el esquisto solamente fue posible elevar el pH a 4.25. Los mejores resultados se obtuvieron con el tamaño de roca de 2.00 mm, con la relación 1/5 y con el tiempo de agitación de 36 horas.

Después se hicieron pruebas para establecer un tiempo mínimo de agitación para alcanzar valores de pH neutros. Se trabajó solamente con las rocas filita y caliza y el tamaño de partícula de 3.35 mm y se mantuvieron las tres relaciones roca/DAM. Al término de cada prueba la solución obtenida se analizó por elementos traza e iones mayores. En general, los resultados mostraron la conveniencia de trabajar con la relación 1/5 ya que se logró incrementar el pH en menor tiempo. El valor máximo alcanzado por la caliza fue de 6.53 y para la filita 6.34, ambos en un tiempo de 100 minutos.

El análisis de las soluciones después de la neutralización muestra que hay remoción de Al y Fe a partir de valores de pH de 4.3, y de Cu a partir de valores de 5. En cuanto a la remoción Cd y Zn comienza a verse disminución en la concentración a partir de $\text{pH} = 6.5$. Y en la de Mn no se aprecia cambio a los niveles de pH alcanzados.

Con estos resultados se hizo un diseño experimental diferente para la siguiente etapa de pruebas. Se propuso una agitación en dos pasos, el primero con filita para remover Al, Fe y Cu, y el segundo con caliza para incrementar a mayor nivel el pH y remover Cd, Zn y Mn.

La Tabla 4.2 muestra los resultados de la prueba con la muestra Pileta. En el primer paso se removió la totalidad de Al, Cu y Fe, entre 9 y 41 % de Cd (con un 100 % en la muestra PF2) y entre 2 y 12% de Zn. En el Mn se observa una remoción de 0 a 32%. En el segundo paso prácticamente se obtuvo el 100% de Cd removido, de 95 a 99% de Zn y de 89 a 94% de Mn.

Tabla 4.2. Concentraciones de elementos traza después de los 1º y 2º pasos de agitación.

1er Paso de Agitación					2o Paso de Agitación				
Muestra	pH	Al mg/L	Fe mg/L	Cu mg/L	Muestra	pH	Al mg/L	Fe mg/L	Cu mg/L
DA-P1	2.74	18.99	111.88	2.29	DA-P2	2.82	18.16	101.71	2.21
PF1	6.64	<LOD	<LOD	<LOD	PF1-2	7.26	<LOD	<LOD	<LOD
PF2	5.00	<LOD	<LOD	<LOD	PF2-2	7.33	<LOD	<LOD	<LOD
PF2-D	6.67	<LOD	<LOD	<LOD	PF2-D2	7.64	<LOD	<LOD	<LOD

LD (mg/L): Al (0.08), Fe(0.01), Cu (0.122)

1er Paso de Agitación					2o Paso de Agitación				
Muestra	pH	Cd mg/L	Mn mg/L	Zn mg/L	Muestra	pH	Cd mg/L	Mn mg/L	Zn mg/L
DA-P1	2.74	2.19	23.14	319.68	DA-P2	2.82	2.10	21.73	309.33
PF1	6.64	1.29	15.60	205.47	PF1-2	7.26	0.06	2.36	13.89
PF2	5.00	<LOD	19.68	258.61	PF2-2	7.33	<LOD	1.37	1.31
PF2-D	6.67	2.17	25.96	311.44	PF2-D2	7.64	<LOD	2.25	2.23

LD (mg/L): Cd (0.02), Mn (0.007), Zn (0.007)

También mediante pruebas de agitación en dos pasos se evaluó el rendimiento de la roca caliza y filita para determinar el volumen de DAM que se puede tratar por unidad de masa. Se utilizaron 150 g de filita en el primer paso de agitación; en el segundo paso fueron 85 g de caliza. La granulometría fue de 3.35 mm. Cada lote fue de 150 mL de DAM y se pusieron en agitación con la misma muestra de roca hasta observar la baja en el rendimiento de la roca para neutralizar. Se hicieron pruebas con dos muestras de filita (F1 y F2), la Figura 4.2 presenta la tendencia en el decaimiento del potencial de la roca F1 y en total se trataron 19 lotes (2,850 mL); con filita se logró un valor máximo de pH de 5.9 (lote 1) y un mínimo de 4.56 (lote 19), mientras que en el segundo paso con la caliza se alcanzó un pH máximo de 7.35 y un mínimo de 6.07.

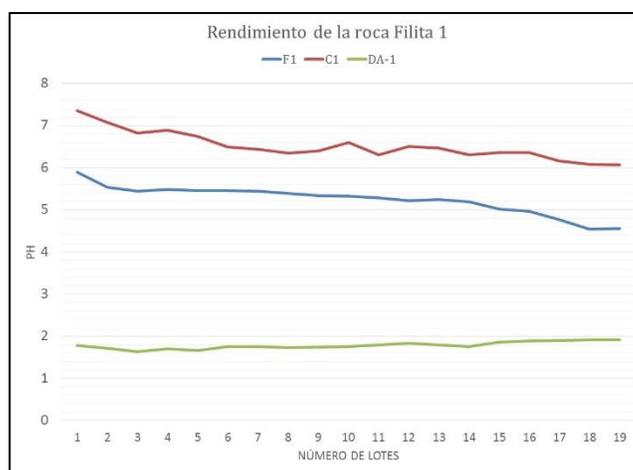


Figura 4.2. Decaimiento del potencial de neutralización de la roca filita (F1) en el primer paso de agitación y de la roca caliza en el segundo paso.

Se hizo el análisis de elementos traza en 10 de los 19 lotes y con los resultados se determinó el decaimiento en el porcentaje de remoción (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Porcentaje de remoción de los elementos traza en la prueba de rendimiento.

Roca	Lote	pH		% de Remoción Final						
		Inicial	Filita	Caliza	Al	Fe	Cu	Cd	Zn	Mn
F1	1	1.78	5.9	7.35	100	100	100	100	99	96
F1	19	1.92	4.56	6.07	100	99	100	93	89	7

Los sedimentos de la primera y segunda agitación se analizaron por microscopía electrónica de barrido acoplada a espectrometría de rayos X por energía dispersa (MEB-EDS). En los sedimentos de la filita hay un incremento en la concentración de Fe (40.5 %) respecto a la concentración de la roca determinada por FRX (2.95 %), y también hay un aumento del Zn (de 0.02 % en la roca a 2.7 % en el sedimento). En los sedimentos de la caliza, no hay una variación significativa del Fe pero aumenta significativamente el Zn (16.8%) respecto al contenido inicial de la caliza (0.01%) y también aumenta el Mn (1.1%) respecto a lo inicial en la roca (0.14%).

El resultado indica que en la filita hay la mayor retención del Fe debido a la precipitación como oxihidróxidos de hierro, mientras que con la caliza se logra la remoción del Zn y Mn; sin embargo, en este caso se considera que es por fenómenos de adsorción sobre la superficie de los oxihidróxidos de hierro.

4.3 Discusión.

Gracias a las aplicaciones de la Química, el hombre puede explorar los recursos naturales del subsuelo como corresponde a los yacimientos minerales y posteriormente explotar dichos recursos que se encuentran en las rocas utilizando explosivos en canteras y en yacimientos minerales, para disgregar la roca de tal manera que se tienen procedimientos seguros y de gran utilidad para extraer minerales útiles a la sociedad.

La mayor parte de los componentes de un explosivo, que se usa en la industria minera, están compuestos por los elementos químicos oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y carbono, junto con algunos elementos metálicos como el aluminio, magnesio, sodio, calcio, etc. Para fabricar dichos explosivos se requiere que estén compuestos de una mezcla del 94% de nitrato de amonio y 6% de diésel, con lo que se asegura un ligero exceso de combustible que provoca un pequeño desbalance en el oxígeno como medida de seguridad. En la reacción se deben oxidar todos los combustibles en él contenidos, donde el balance de oxígeno resulta vital. La energía liberada por los explosivos se debe calcular por medio de la diferencia en el calor de formación como en el de los ingredientes de los productos utilizados. Las consecuencias de contar con un balance de oxígeno son evidentes, se forman diferentes productos y cantidades, pero el mayor impacto se tiene en la reducción de la energía liberada.

Con relación a la generación de drenaje ácido de mina, éste es un fenómeno inducido que se puede presentar en las operaciones mineras donde se explotan minerales con sulfuros. La liberación del agua ácida con altos contenidos de metales

pesados en solución y una alta carga de sulfatos, representan un riesgo para el ambiente si no se toman medidas adecuadas para su control, por lo que representan un peligro para las personas que trabajan en las minas o que viven en comunidades próximas.

El caso de estudio presentado en este capítulo, es un ejemplo de las situaciones a las que se enfrentan investigadores e ingenieros en la práctica de la extracción de minerales y que es necesario resolver a fin de evitar daños al ambiente por una actividad que es básica en el desarrollo del país, que provee de materia prima.

Los sistemas de tratamiento con rocas carbonatadas, como el caso de la filita y caliza, constituyen una alternativa interesante para controlar el drenaje ácido y evitar la afectación de suelos y cuerpos de agua subterráneos y superficiales. El estudio de los procesos geoquímicos que ocurren durante la neutralización del drenaje ácido utilizando rocas carbonatadas, es importante porque permite explicar con reacciones químicas qué fenómenos ocurren para lograr inmovilizar los metales pesados contenidos en el agua.

De lo anteriormente expuesto, se puede ver que la generación del drenaje ácido, así como su tratamiento con rocas carbonatadas y la remoción de los metales contenidos en solución, se relacionan con procesos químicos que dependen de las características propias de los minerales, así como de las condiciones que se tienen en el medio ambiente.

V.- Aplicaciones a los Métodos Geofísicos.

Existe una estrecha relación entre la Química y la Geofísica en toda la cadena de valor en la prospección de recursos naturales, pues gracias a la Química, a los principios físicos en que se sustentan los métodos de exploración geofísica y el medio en que interactúan al momento de realizar las mediciones, se logra explorar el subsuelo.

En la investigación pura, los métodos geofísicos tienen su importancia, por ejemplo, en interpretar la composición química de las capas de la tierra en núcleo, manto y corteza. El núcleo interno es interpretado como una esfera sólida y viscosa de composición, principalmente, de Níquel y Hierro, mientras el núcleo externo es interpretado como una zona líquida de Hierro.

De forma general, la Geofísica fundamenta sus estudios, en la utilización de las propiedades físicas de los cuerpos de roca que constituyen la corteza terrestre, el análisis y la interpretación de dichas propiedades proveen imágenes y datos que permiten inferir estructuras geológicas, modelos estratigráficos y distribución de propiedades petrofísicas. Los estudios geofísicos son imprescindibles en cualquier estudio de exploración de recursos naturales, sobre todo, en aquellos objetivos que no están al alcance de las técnicas geológicas convencionales, debido a su profundidad (ver referencia 5).

Los materiales que componen a las rocas, responden a diferentes impulsos físicos, gracias a ello la ingeniería geofísica puede hacer incidir de manera artificial algunas señales sobre el terreno, o puede utilizar campos naturales para llevar a cabo sus mediciones.

Gracias a lo anterior es posible, por ejemplo, determinar la localización de un cuerpo de roca con características especiales, identificar las estructuras que lo conforman, caracterizar las propiedades físicas y químicas que lo definen (como dimensiones y composición), obtener datos con el fin de ser interpretados y analizados para calcular y evaluar factores de interés económico y social en el estudio, predecir su comportamiento en el tiempo y la rentabilidad de un proyecto, entre otros aspectos relevantes de ingeniería.

Los estudios geofísicos con auxilio de otras áreas del conocimiento, serán los que revelen toda la información que se obtenga a lo largo del tiempo, sin embargo, siempre serán los elementos de la materia quienes otorguen el conocimiento fundamental de su composición para desarrollar las investigaciones científicas deseadas (ver referencia 5).

En el momento en que se realiza una prospección, los cuerpos en el subsuelo están conformados por diferentes elementos que los caracterizan y los diferencian entre sí. Estas diferentes composiciones en la roca provocan anomalías que son detectadas con los dispositivos empleados dependiendo del método aplicado.

Cuando se detectan anomalías en un campo potencial natural de la Tierra, éste se ve modificado en el área de prospección. Tal es el caso que, al encontrar rocas mineralizadas, éstas afectan los campos de gravedad y magnético debido a sus diferentes densidades y cantidad de magnetita ($\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$) que poseen, respectivamente.

Con ayuda de las herramientas geofísicas a través de la roca, en el momento de inducir corrientes eléctricas o durante la propagación de ondas sísmicas, se conocen los fluidos que saturan el medio poroso obteniendo parámetros que permitan caracterizar el sistema y conocer las características plásticas de las rocas en la corteza terrestre, permitiendo revelar imágenes del subsuelo que posteriormente serán interpretadas para identificar un posible cuerpo con el potencial de ser un recurso para ser explotado.

La siguiente aplicación fue desarrollada por Iza Canales García, Isabel Domínguez Trejo, Antonio de Jesús Mendoza Martínez, quienes describieron algunas de las técnicas geofísicas más utilizadas en la industria de la exploración de recursos naturales, sus principales objetivos y los resultados que podemos obtener al analizar los datos obtenidos.

5.1 Métodos gravimétricos.

Desde la antigüedad el ser humano se percató de la existencia de la gravedad terrestre ya que, por ejemplo, Isaac Newton (1642-1727) es quien logró expresar en forma matemática, que la fuerza de atracción es directamente proporcional a la masa de los cuerpos e inversamente al cuadrado de la distancia entre ellos, la que se expresa en la siguiente relación (ver referencia 5).

$$F = K \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Donde: K= constante

La Figura 5.1 ilustra las fuerzas de atracción entre las masas y la distancia que las separa.

En nuestro planeta encontramos un caso particular de la gravitación, llamado gravedad.

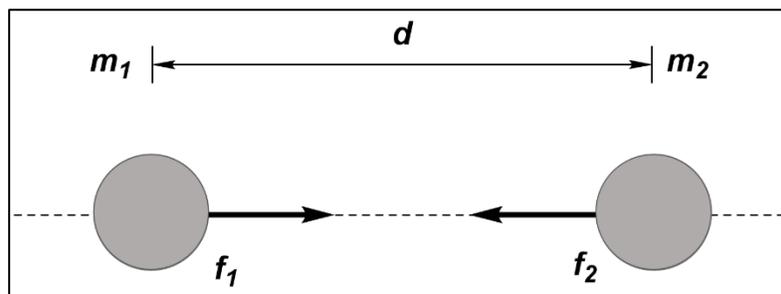


Figura 5.1 Fuerza de atracción entre los cuerpos.

La aceleración que produce en los cuerpos la masa de la Tierra es conocida como: aceleración de la gravedad, de tal forma que:

$$g = K \frac{m}{R^2}, \quad \text{donde} \quad g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} = 981 \text{ gales}$$

Tomando estas premisas es como se han desarrollado instrumentos para la prospección. El gravímetro (Figura 5.2) es el instrumento utilizado para realizar las mediciones, éste se basa en el principio de dinamómetro. Lo componen una masa suspendida de un resorte, la fuerza de la masa deforma el resorte. En condiciones de equilibrio dinámico el resorte oscila alrededor de la posición del equilibrio estático debido a la fuerza de gravedad (ver referencia 5).



Figura 5.2. Toma de datos con gravímetro. Modelo CG-5 AUTOGRAV.

El gravímetro puede medir diferencias muy finas en la gravedad, es por esto que grandes cuerpos mineralizados pueden aumentar la gravitación en regiones específicas debido a las propiedades físicas de las rocas.

Las anomalías de la gravedad son la variación de los valores medidos en la gravedad respecto a la gravedad normal como campo potencial natural de la Tierra. En la Figura 5.3 se observa una anomalía asociada a un cambio de densidades donde la densidad del yacimiento (densidad 1) es mayor que la del cuerpo de densidad 2 (ver referencia 5).

Así, los materiales de alta densidad tales como: hierro, plomo, zinc, etc. producen anomalías positivas; mientras que las acumulaciones salinas producen anomalías negativas, dada su baja densidad.

La gravimetría tiene aplicaciones importantes en la búsqueda de materiales que tengan contrastes de densidad con el medio que los circunda, por ejemplo, los depósitos minerales, detección de cuerpos salinos como diapiros y domos salinos, localización de cavidades subterráneas.

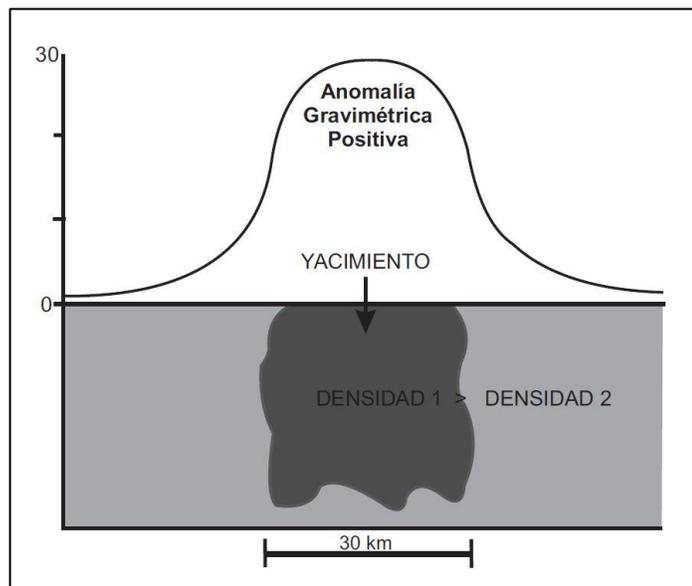


Figura 5.3. Anomalía gravimétrica.

La aplicación de la gravimetría para la localización y cuantificación de estructuras diapíricas de materiales salinos, se remonta a mediados de los años cuarenta y ha ido evolucionando con el tiempo. El buen contraste de densidad entre los materiales del diapiro y los materiales que lo encajan, permite una buena relación señal-ruido, pudiendo obtener cartografías de anomalías gravimétricas muy claras, que permiten en muchas ocasiones plantearse una modelización cuantitativa.

De esta manera, los métodos gravimétricos se relacionan y corresponden con la distribución, la estructura y la composición de las masas rocosas del interior de la Tierra.

5.2 Métodos magnetométricos.

La magnetometría al igual que la gravimetría se ayuda de los campos potenciales naturales de la Tierra, este método geofísico utiliza el campo magnético que afecta a los yacimientos que contienen magnetita ($\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$). Debido a esto, los depósitos que contienen este mineral generan un campo magnético inducido secundario como se muestra en la Figura 5.4 (ver referencia 5).

La Tierra (Figura 5.5) actúa como un dipolo generando un campo magnético, el dipolo está orientado hacia el Sur, por lo tanto, en el hemisferio Norte geográfico se ubica el polo Sur magnético y viceversa.

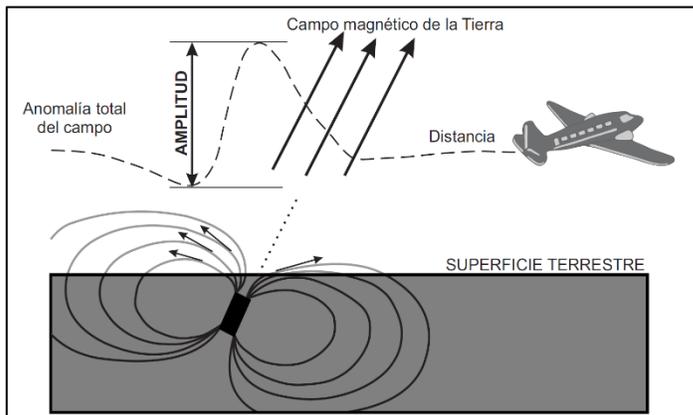


Figura 5.4. Prospección electromagnética.

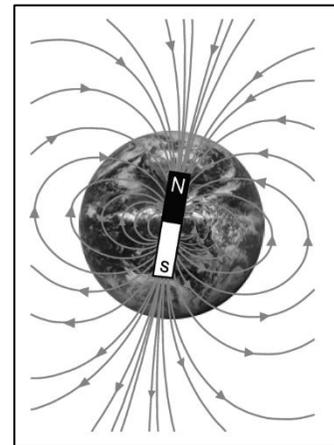


Figura 5.5. Campo magnético natural de la Tierra

Comúnmente el campo magnético de la Tierra es representado por líneas imaginarias, las cuales indican la dirección e intensidad. Al número total de líneas en el medio se le conoce como: flujo magnético.

El número de líneas que pasan perpendicularmente a través de la superficie es conocido como: inducción magnética o densidad de flujo. Si un cuerpo magnetizable es puesto en un campo magnético adquiere magnetización proporcional al campo, esto se conoce como susceptibilidad magnética.

La imantación inducida depende de la susceptibilidad magnética de una roca o mineral y del campo externo mientras que la imantación remanente de una roca se refiere al magnetismo residual de la roca sin un campo externo.

Las rocas poseen propiedades magnéticas, algunos materiales se oponen al flujo magnético, teniendo una orientación perpendicular a las líneas de flujo, son

conocidos como materiales diamagnéticos; mientras que los materiales que atraen las líneas de flujo y se orientan en el mismo sentido se denominan paramagnéticos. Los ferromagnéticos atraen los campos magnéticos con mucha intensidad, el hierro y el níquel son ejemplos de estos materiales.

La susceptibilidad magnética en las rocas depende del contenido de magnetita como ya se ha mencionado anteriormente. Los diferentes tipos de rocas tiene un comportamiento en función a su origen, por lo que de manera general se tienen los siguientes casos (ver referencia 5):

Rocas sedimentarias – diamagnéticas
Rocas metamórficas – paramagnéticas
Rocas ígneas – ferromagnéticas

El magnetómetro (Figura 5.6), mide las anomalías magnéticas en la superficie y son los instrumentos empleados para realizar las mediciones.



Figura 5.6. Magnetómetro utilizado en la prospección

La aplicación de este método se tiene en la exploración minera, petrolera y en la Arqueología, así como en la búsqueda de agua en el subsuelo. En la industria petrolera el método brinda información sobre la profundidad de las rocas en el basamento, caracterizando las cuencas para posteriormente indagar en la búsqueda de yacimientos sobre el basamento.

En las exploraciones mineras se aplica el método magnético en la búsqueda directa de minerales magnéticos y en la búsqueda de minerales no magnéticos asociados con los minerales, que ejercen un efecto magnético mensurable en la superficie terrestre. Con este método se identifican las variaciones del campo geomagnético, es decir, anomalías magnéticas relacionadas con un depósito mineral con un cierto contenido en los minerales mencionados.

En los yacimientos de tipo Pórfidos Cupríferos, los métodos magnetométricos son utilizados en la búsqueda de cuerpos intrusivos principalmente granito y monzonita,

rocas con alto contenido de magnetita e ilmenita, cuyos minerales tienen alta susceptibilidad magnética.

Los depósitos de Fe asociados con rocas magmáticas frecuentemente están caracterizados por un cociente magnetita/hematita alta y en consecuencia pueden ser detectados directamente por las mediciones magnéticas.

Por el método magnético se puede localizar depósitos de Fe cubiertos por otras formaciones geológicas y situados en cierta profundidad en la corteza terrestre como por ejemplo los rellenos hidrotermales de fracturas descubiertos por medio de sondeos realizados a lo largo de anomalías magnéticas de forma longitudinal.

Por su asociación con minerales magnéticos como magnetita y pirrotina, minerales no magnéticos como los metales básicos níquel, cobre y oro por ejemplo pueden ser detectados por el método magnético. Frecuentemente se emplea el método magnético en la exploración para diamantes, que ocurren en chimeneas volcánicas de kimberlitas o lamprófidos.

En general, los métodos magnetométricos y su relación con la Química tienen aplicación en la minería en: la exploración de Oro Aluvial (asociado a magnetita), en yacimientos de Hierro y yacimientos metálicos asociados a minerales magnéticos (Cu, Fe Au) y en la delimitación de zonas de alteración hidrotermal desmagnetizadas (Pórfidos cupríferos).

5.3 Métodos sísmicos.

La sismología estudia el origen y la propagación de los movimientos ondulatorios en la corteza terrestre. Cuando se produce un sismo, las rocas de la corteza se mueven propagando las ondas en todas direcciones alejándose del foco, estas perturbaciones se propagan a diferentes velocidades dependiendo de las propiedades elásticas del material que encuentren (ver referencia 5).

Para la aplicación del método es necesario generar la energía que se propagará por el medio, de esta manera la prospección sismológica provoca un sismo artificial mediante dispositivos que controlan la energía. Para generar la energía sísmica es necesario producir un impacto en el suelo mediante sistemas de explosivos como son: dinamita, cargas dirigidas, cordones explosivos, accionados mediante procesos térmicos o de presión. También es posible con un sistema mecánico: caída de pesas, explosiones de gases confinados, cañones neumáticos y vibradores.

Las operaciones en campo identifican en el terreno la posición de los impactos y la detección de los movimientos que regresan a la superficie después de su propagación en el subsuelo por medio de ondas reflejadas. Produciendo impactos en puntos determinados para obtener los registros de las señales sísmicas. El

tiempo de llegada de las ondas se relaciona con la distancia del punto donde se realizó el impacto y profundidad, donde cambia de velocidad.

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran los de refracción y reflexión sísmica. En estos métodos se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción - o reflexión - sísmica. A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, - con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos -, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido (ver referencia 5).

La Figura 5.7 esquematiza el método sísmico para la obtención de datos. El equipo básico consiste de los sensores; la unidad de adquisición, en donde se almacenan los movimientos del terreno detectados por cada sensor; los cables de conexión entre los sensores y la unidad de adquisición; el cable del trigger, que se encarga de marcar el momento de inicio de registro en la unidad de adquisición (ver referencia 5).

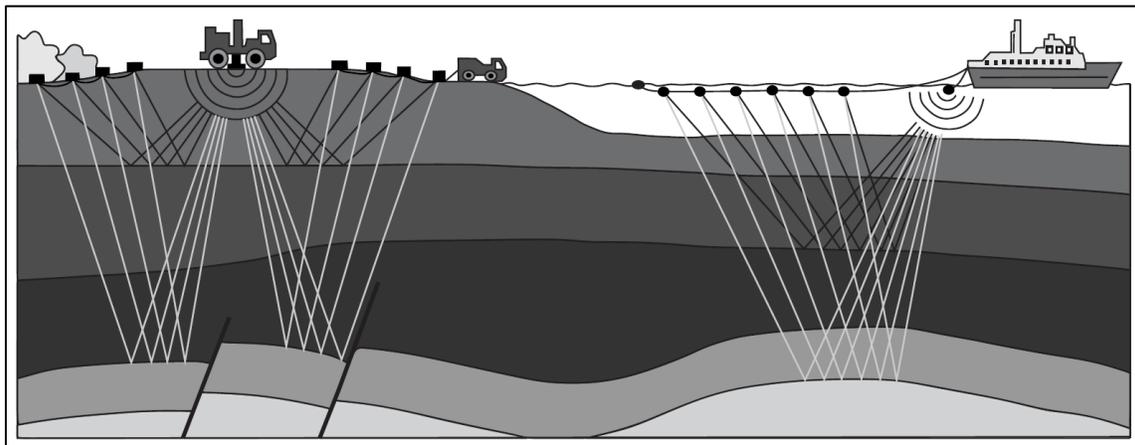


Figura 5.7. Método sísmico, prospección sísmica en mar y tierra.

Los registros de cada sensor tienen información de los movimientos del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas. Estos son analizados en la refracción sísmica para obtener el tiempo de llegada de las primeras ondas a cada sensor desde el punto de disparo, y en la reflexión para obtener información de las ondas que son reflejadas en las diferentes interfaces de suelo, para lo cual es estudiado el sismograma completo.

Los sismómetros utilizados en los métodos sísmicos miden el desplazamiento del suelo en tres direcciones sobre un gran rango de frecuencias, muestran variaciones en frecuencia de diferentes fases (como P, S, y ondas superficiales). La diferencia en frecuencia es la resolución de la estructura con diferentes ondas, y las diferentes fases viajan por distintas partes del interior de la Tierra.

El método de refracción aprovecha las refracciones de las ondas sísmicas y tuvo su inicio con los descubrimientos de las discontinuidades de Corteza-Manto y de Manto-Núcleo, es decir las de Mohorovicic y de Gutenberg.

Las ondas reflejadas también se comenzaron a analizar en la década de 1920, pero se utilizaban principalmente para detectar domos salinos o contactos de arcilla-caliza, posteriormente el método de reflexión desplazó al de Refracción en la exploración petrolera.

Una de las aplicaciones, gracias a los métodos sísmicos, es en la ciencia pura al poder determinar que la Tierra está formada por diversas capas de distinta densidad y composición, definiendo el núcleo en interno, externo, manto y corteza.

Andrija Mohorovicic notó que las ondas P medidas a más de 200 km del epicentro de un terremoto, llegaban con más velocidad que las medidas dentro de un radio de 200 km. Esto se debía a que las ondas más veloces viajan a través de un medio que les permite acelerarse. Con base en esto, Mohorovicic definió el borde del interior de la Tierra ubicado entre la corteza y el manto.

Las ondas sísmicas viajan más rápido en el manto que en la corteza, porque éste se compone de un material más denso. En 1914 se descubrió el núcleo terrestre y se definió un borde agudo del núcleo y el manto, donde las ondas P se refractan y disminuyen velocidad. Al pasar del manto al núcleo externo, aumenta la densidad, pero disminuye drásticamente la velocidad de las ondas P y las ondas S no se transmiten. Esto indica que el material del núcleo externo es líquido. Tanto la densidad como la velocidad de las ondas P aumentan con la profundidad, donde se encuentra la discontinuidad el núcleo externo y el núcleo interno; este último es sólido.

El núcleo interno es interpretado como una esfera sólida y viscosa de composición, principalmente, de Níquel y Hierro, mientras el núcleo externo es interpretado como una zona líquida de Hierro.

5.4 Métodos eléctricos.

Los métodos eléctricos utilizan la medición en campos eléctricos o electromagnéticos para investigar las características estructurales, yacimientos minerales, condiciones del subsuelo. Utilizan la energía de los campos potenciales y pueden medir los datos arrojados por los campos generados artificialmente.

Los métodos eléctricos están basados en tres propiedades eléctricas identificadas en las rocas: Resistividad, Constante dieléctrica y actividad electroquímica en el terreno. De acuerdo con la corriente eléctrica pueden clasificarse en (ver referencia 5):

- Corrientes electrónicas
- Corrientes electrolíticas
- Propiedades dieléctricas

Comúnmente se clasifican los métodos eléctricos de acuerdo al tipo de campo utilizado. Campos naturales: campo constante y campo variable o campos artificiales: potencial del campo y campos electromagnéticos o por energía primaria inducida.

El flujo de corriente considera un conjunto de capas de resistividades iguales dentro de cada una de ellas y distintas entre sí, superpuestas y separadas en planos paralelos.

Cuando la corriente se aplica al suelo conductivamente por medio de electrodos, las variaciones en la conductividad del subsuelo alteran el flujo de corriente en el interior, lo cual es una variación de la distribución del potencial eléctrico. Esta alteración dependerá del tamaño de la forma, localización y resistividad eléctrica de los cuerpos del subsuelo (Figura 5.8). En la mayoría de las rocas la conducción eléctrica es electrolítica (ver referencia 5).

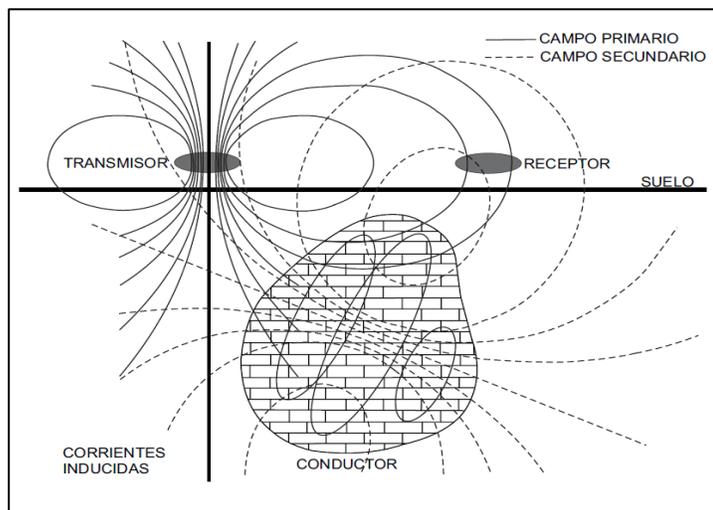


Figura 5.8. Detección de cuerpo en el subsuelo.

La resistividad será función de su contenido de electrolitos y proporcional a la porosidad y saturación. Gran cantidad de los minerales contenidos en las rocas son aislantes, debido a esto la electricidad fluye por el electrolito en el medio poroso.

Encontramos su aplicación en casos donde las características de las formaciones geológicas son constantes dentro de la misma formación y contrasten a otras formaciones. La salinidad de los líquidos contenidos en las formaciones hace que la resistividad depende de ello. Una gran aplicación de este método se tiene en la ingeniería civil, pues puede definir las condiciones del suelo para diferentes fines como construir infraestructura como tuberías, líneas de ferrocarril, subestaciones eléctricas entre otros.

Su aplicación con la Química se observa en la utilización de los métodos eléctricos para identificar materiales de diferentes conductividades: por ejemplo, suelen ser muy conductores, al igual que el grafito. En la industria minera en yacimientos de

sulfuros metálicos en forma diseminada como Pórfidos Cupríferos, yacimientos en Stock Work, en la prospección de estructuras tabulares que contengan sulfuros y en cuerpos masivos de Magnetita

También se utilizan mucho para la investigación de agua, debido a que las rocas que contienen agua se hacen algo más conductoras que las que no la contienen, siempre y cuando el agua tenga una cierta salinidad que la haga a su vez conductora.

Teniendo en cuenta las técnicas geofísicas, se busca identificar y observar las distribuciones geológicas que se encuentran a diferentes profundidades, mediante algunos parámetros físicos como la conductividad, que se puede obtener por medio de algunos métodos eléctricos como la resistividad y la polarización inducida con la cargabilidad. La finalidad es la obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo a partir de medidas realizadas desde la superficie, centrado en la localización de minerales a cierta profundidad. Los resultados permiten caracterizar las zonas anómalas más importantes, es decir zonas de alteración en las que se pueden encontrar, por ejemplo, sulfuros asociados a pórfido de cobre, de acuerdo a los parámetros de resistividad y cargabilidad.

5.5 Métodos electromagnéticos.

Estos métodos brindan información similar a los métodos eléctricos, cuando las condiciones del campo no permitan llevar a cabo una prospección eléctrica.

Se basan en el terreno aprovechando sus propiedades eléctricas o electromagnéticas, donde se siguen las siguientes leyes de la física: Ley de Faraday y Ley de Ampere (ver referencia 5).

La Ley de Faraday establece que se produce un voltaje eléctrico siempre que exista un campo magnético variable en el tiempo.

Por su parte la Ley de Ampere establece que un campo magnético es producido por una corriente eléctrica.

Los sistemas electromagnéticos se clasifican por: la geometría de las bobinas y a movilidad del sistema. Existe una infinidad de configuraciones de campos diferentes para ser propuestos en una prospección. Tienen la ventaja de medir a pesar de que en la zona existan materiales muy resistivos al flujo de la electricidad o incluso muy conductivos, sin la necesidad de ocupar electrodos (Figura 5.9). El campo magnético variable se emplea en el dominio de las frecuencias, esto es cuando la señal se realiza de acuerdo a un número discreto de frecuencias. En el dominio del tiempo, este análisis se realiza en un intervalo de tiempo específico.

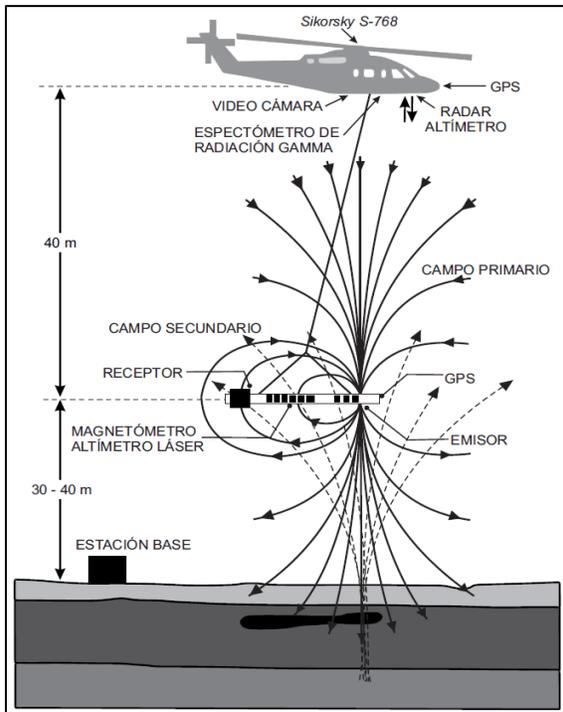


Figura 5.9. Prospección electromagnética.

Los métodos electromagnéticos hoy en día se aplican en los estudios ambientales. Todos miden la conductividad eléctrica de los materiales de subsuelo, el rango en que varía la conductividad eléctrica es muy amplio. Siendo especialmente útiles en la exploración de acuíferos, cartografía de contaminantes industriales, medición de la salinidad, detección de la interfase de agua dulce y salada, localización de fracturas, etc (ver referencia 5).

El método electromagnético, estudia la influencia del terreno sobre un campo electromagnético artificial. Puede aplicarse desde aviones y recientemente, comienza a utilizarse en estudios hidrogeológicos regionales.

La aplicación de este método se basa en la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo y una muy importante es para las investigaciones hidrogeológicas como identificación de aguas subterráneas. Permite detectar cambios en la salinidad del agua subterránea y, en particular, permite detectar la interfase agua dulce/salada, debido a que la resistividad de las rocas saturadas se ve muy afectada por la salinidad intersticial.

La interpretación de los datos permite diferenciar unidades geoelectricas principales con valores de resistividad, determinando contrastes, por ejemplo, entre el acuífero de agua dulce y la intrusión de agua de mar.

5.6 Discusión.

Los métodos geofísicos son herramienta útil y necesaria que permiten el estudio del subsuelo y de sus procesos específicos, con los que es posible interpretar la composición química del interior de la Tierra.

Específicamente, con los métodos geofísicos se obtiene información del subsuelo, como la composición química de las rocas, del agua o de grandes componentes de las capas internas de la Tierra como la composición química del núcleo o del manto. Con esta información y con los conocimientos de Química, es la que permite conocer cuál es la composición de los materiales terrestres que se encuentran en la Corteza, en el Manto y en el Núcleo de la Tierra.

Las aplicaciones de los métodos geofísicos se realizan en la ciencia pura, en la exploración minera, petrolera, así como en la búsqueda de agua en el subsuelo y en los estudios ambientales, interviniendo la Química como materia fundamental.

Las anomalías generadas por los elementos químicos contenidos en las rocas y en los fluidos del interior de la Tierra son utilizados por los diferentes métodos geofísicos como herramientas en la exploración de recursos naturales del subsuelo.

Cuando en el subsuelo se tiene rocas con contenido mineral de interés para la sociedad, por ejemplo sulfuros, éstas afectan los campos de gravedad y magnético debido a la diferente densidad de los minerales que la conforman, ocasionando anomalías que se pueden identificar con métodos geofísicos.

En el momento de inducir corrientes eléctricas o durante la propagación de ondas sísmicas en el subsuelo, se obtiene información sobre los fluidos que saturan el medio poroso, permitiendo caracterizar el sistema y conocer si existen o no sustancias de interés para la sociedad.

VI.- Conclusiones.

Este material didáctico aporta información relevante y de utilidad a los estudiantes de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ya que cuenta con aplicaciones de la Química en Geología del Petróleo, hidrogeología, minería y métodos geofísicos. Los estudiantes contarán de manera más directa con material que será de beneficio para mejorar su desempeño en su carrera estudiantil y al egresar en su desarrollo profesional en el ámbito laboral.

En Geología del Petróleo es indispensable el uso y comprensión de la Química en la composición y uso de hidrocarburos, así como en los componentes o materiales que se usan en la exploración y explotación, por ejemplo en los lodos de perforación y las sustancias que se utilizan en su recuperación en sus distintas fases.

En la recuperación mejorada de hidrocarburos, los métodos más usados son principalmente térmicos y de inyección de agua con productos químicos (Inyección de agua viscosa o polímeros, métodos alcalinos, métodos de baja tensión o surfactantes). Los procesos químicos buscan mejorar la relación de movilidades entre el aceite y el agua. El propósito de estos métodos es mejorar la eficiencia del desplazamiento mediante una reducción de las fuerzas capilares, para mejorar la eficiencia de barrido, reducir la viscosidad del crudo, aumentar la viscosidad del agua o taponar los caminos preferenciales del hidrocarburo.

En hidrogeología, la Química tiene su principal aplicación en la hidrogeoquímica, ya que con ella se estudian las propiedades químicas del agua superficial y subterránea, se analizan los iones disueltos en agua, los procesos de interacción agua-sólido, su circulación, entre otros.

Los iones fundamentales de los cuales estudia la hidrogeoquímica son: Cloruro (Cl), Sulfato (SO_4), Bicarbonato (CO_3H^-), Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{++}) y Magnesio (Mg^{++}). La modelación hidrogeoquímica permite evaluar procesos de mezcla, especiación química, índices de saturación y transporte reactivo entre diferentes componentes y establecer la compatibilidad hidrogeoquímica entre el agua subterránea nativa y el agua de recarga como de una planta de tratamiento.

En la minería, la aplicación de la Química está presente en la explotación, la metalurgia y en la contaminación por los residuos, por lo que se puede aplicar como ejemplo, en las reacciones que tienen que ver con los combustibles de los explosivos, controlando el balance de oxígeno para que la mezcla tenga suficiente oxígeno para completar la reacción.

Otro ejemplo tiene que ver con la generación de Drenaje Ácido de Mina se aplican sistemas de tratamiento que utilizan materiales químicos naturales, como rocas carbonatadas, plantas, materia orgánica y/o microorganismos. Los carbonatos juegan un papel en el proceso de neutralización del drenaje ácido utilizando minerales como calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$) o magnesita (MgCO_3), que son consumidores de la acidez del

agua. El uso de algún reactivo alcalino permite elevar el pH de la solución y remover elementos traza por precipitación.

El conocimiento de las variaciones de pH es fundamental ya que determinan si un elemento puede estar en solución (forma acuosa) o bien precipitar en forma de hidróxido, de carbonato, de sulfuro; o no precipitar y quedar retenido por algún fenómeno de adsorción sobre la superficie de un mineral secundario formado en el proceso de oxidación.

Las aplicaciones de la Química en los métodos geofísicos se realizan en la ciencia pura y en la Ingeniería aplicada, particularmente en la exploración minera, petrolera, así como en la búsqueda de agua y vapor de agua en el subsuelo y en los estudios de impacto ambiental.

Gracias a los métodos sísmicos, se interpreta la composición química de las capas de la Tierra y se les divide como núcleo, manto y corteza, cuyo núcleo interno está compuesto por Níquel y Hierro, y el núcleo externo es una zona líquida compuesta principalmente de Hierro.

Con los métodos gravimétricos y magnéticos al encontrar rocas mineralizadas con sulfuros, éstas afectan los campos de gravedad y magnético debido a sus diferentes densidades y cantidad de magnetita ($\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$), por lo que se puede interpretar la presencia de un yacimiento mineral.

Los métodos eléctricos y electromagnéticos se utilizan en la detección de cuerpos salinos como diapiros, Canopies y domos salinos; también son útiles en la localización de cavidades subterráneas y de acuíferos. Se utilizan también para detectar cambios en la salinidad del agua subterránea y para delimitar la interfase agua dulce/salada, entre otras aplicaciones.

El conocimiento de química ayuda a la comprensión de cada una de las aplicaciones descritas, desde los mecanismos en la recuperación mejorada de hidrocarburos, la modelación hidrogeoquímica del agua subterránea, los balances de las reacciones de explosivos, los sistemas de tratamiento de drenaje ácido de mina y el estudio del subsuelo y de sus procesos químicos específicos de acuerdo a cada método utilizado.

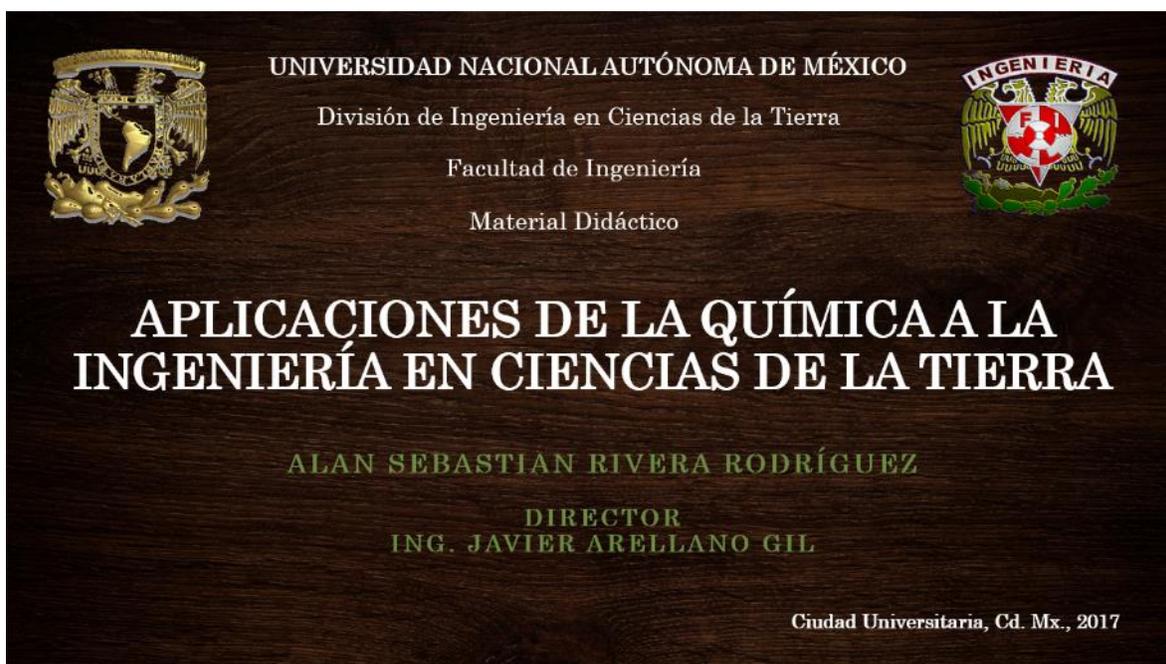
Lo anterior propicia la aplicación de la teoría de la Química con la práctica de cada carrera de Ciencias de la Tierra, lo que tiene como consecuencia un aprendizaje significativo en los estudiantes, una mayor motivación, la buena acreditación de la asignatura de Química para Ciencias de la Tierra y a los egresados el buen desarrollo profesional laboral.

Bibliografía.

- 1) Arellano-Gil, Pérez-Martínez, Pérez-Martínez (2016). El libro "Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones". División de ciencias básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 2) Arias-Paz, Salinas-Calleros (inédito). Estudio hidrogeológico en la localidad El Palmar, municipio de Papantla, Veracruz. Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 3) Aguilar Veloz, Díaz Sanabria, (2007). "EVALUACION DE BIOPOLIMEROS PARA APLICACION EN PROCESOS DE RECUPERACION MEJORADA DE PETRÓLEO". CONGRESO DE PETROLEO Y GAS, Cuba
- 4) Blowes, D.; Ptacek, C.; Jambor, J. y Weisener, C., 2004. The geochemistry of acid mine drainage. En: H. Holland y K. Turekian, edits. Treatise of Geochemistry. Oxford:Elsevier, pp. 149-204.
- 5) Canales-García, Domínguez-Trejo, Mendoza-Martínez, (inédito). Métodos Geofísicos y la Química de la Tierra. Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 6) Del Valle Toledo (1984), "Apuntes de Introducción a la Geofísica", División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra departamento de geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- 7) Estrada, L. "Prospección sísmica", 2008, Universidad de Tucuman. Argentina.
- 8) Estrada, L. (2012). "Apuntes de prospección geoeléctrica". Facultad de ciencias exactas y tecnología departamento de geodesia y topografía, Universidad Nacional de Tucuman, Argentina.
- 9) Hernández-Espriú, Zapata-Norberto, Velázquez-Aguirre, Macías-Medrano, Alonso Soberón. (inédito). Modelado hidrogeoquímico para predecir procesos de mezcla en acuíferos sujetos a recarga gestionada. Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 10) Hartman, Howard L., Jan M. Mutmansky / Introductory mining engineering 2nd ed. New York, J. Wiley, c2002
- 11) Hartman, Howard L., Jan M. Mutmansky / Introductory mining engineering 2nd ed. New York, J. Wiley, c2002
- 12) Daughlon, Christian G. (1988). «Quantitation of Acrylamide (and Polyacrylamide): Critical review of methods for trace determination/formulation analysis & Future-research recommendations» (PDF). EPA Environmental Sciences Division homepage. The California Public Health Foundation. Consultado el 30 de junio de 2010.
- 13) Dillon PJ (ed) (2002) Management of aquifer recharge for sustainability. In: Proceedings of 4th International Symposium on Artificial Recharge. Balkema Publishers, AA.
- 14) MATA ARGANDOÑA, (2010). "PROCESOS DE RECUPERACIÓN MEJORADA VIABLES A APLICAR MEDIANTE UN CRITERIO DE SELECCIÓN JERARQUIZADO", Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
- 15) Martínez-Alfaro, PE, Martínez-Santos, P, Castaño-Castaño, S (2006) Fundamentos de Hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa, España

- 16) Pérez-Martínez, Arellano-Gil, Soto-Ayala (2016). La Química como herramienta en la formación integral de los estudiantes de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, División de ciencias básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 17) Ramírez Figueroa, Gabriel. (inédito). La química en la ingeniería de Minas y Metalurgia. Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 18) RUBÍ VILLEGAS, RAÚL (2017). La Química de los lodos de perforación ejemplos y aplicaciones en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura.
- 19) Reddi, L. e Inyang, H., 2000. Geoenvironmental engineering, principles and applications. US: Marcel Dekker Inc.
- 20) Santos Jallath, José Enrique. (inédito). Geoquímica en el Drenaje Ácido de Mina: aplicación en un sistema de tratamiento con rocas calcáreas. Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 21) Soto-Ayala, Arellano-Gil, Pérez-Martínez, Santillán-Piña, Arcos-Hernández (2017). Importancia de la Química en las Ciencias de la Tierra, Naturalis, boletín de la coordinación de física y química, División de ciencias básicas, facultad de ingeniería, universidad, Nacional Autónoma de México.
- 22) Soto-Ayala, Arellano-Gil, Pérez-Martínez (2016). LA ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA EN INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA CON APOYO DE EJEMPLOS Y CASOS PRÁCTICOS, División de ciencias básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 23) Sengupta, M., 1993. Environmental impacts of mining: monitoring, restoration and control. US: Lewis Publishers.
- 24) Ward, J, Dillon, P (2009) Robust design of Managed Aquifer Recharge Policy in Australia, CSIRO Water for a Healthy Country Flagship Report to National Water Commission
- 25) Xanke J, Goeppert N, Sawarieh A, Liesch T, Kinger J, Ali W, Hötzl H, Hadidi K, Goldscheider N (2015) Impact of managed aquifer recharge on the chemical and isotopic composition of a karst aquifer, Wala reservoir, Jordan. Hydrogeol J 1027–1040. doi: 10.1007/s10040-015-1233-6
- 26) Younger, P. L.; Banwart, S. A. y Hedin, R. S., 2002. Mine water hidrology, pollution, remediation. Great Britain: Kluwer Academic Publishers.
- 27) Zúñiga, F.(2011). "Notas introductorias sismología", Centro de Geociencias, UNAM, Juriquilla, México

**Adjunto 1.- Presentación material didáctico.
Aplicaciones de la Química a la Ingeniería en Ciencias de la Tierra.**



OBJETIVO

- Elaborar material didáctico como parte de la realización del libro “Química para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones”, dentro de un proyecto DGAPA-PAPIME PE103116, apoyando en la elaboración de las aplicaciones de la Química en Geología del Petróleo, Hidrogeología, Minería y Métodos Geofísicos, con conceptos actualizados y orientados a mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de los estudiantes en Ingeniería en las Ciencias de la Tierra.

Contenido

- I. Introducción
- II. Metodología
- III. Aplicaciones a la Geología del Petróleo.
- IV. Aplicaciones a la hidrogeología.
- V. Aplicaciones a la Minería.
- VI. Aplicaciones a los Métodos Geofísicos.
- Conclusiones

I. Introducción.

A lo largo de la historia de la humanidad el conocimiento de la Química ha sido de trascendental ayuda, ya que ha permitido conocer mejor los fenómenos de transformación de la materia que se llevan a cabo y que suceden en cualquier parte del sistema Tierra. Prácticamente no existe una actividad desarrollada por el hombre en la cual no esté involucrado algún concepto relacionado con la Química.



Ejemplo de aplicaciones de la Química a las ingenierías relacionadas con las Ciencias de la Tierra se encuentra:



Petróleo



Minería



Hidrogeología



Métodos Geofísicos

II. Metodología

Proceso

1. Recopilación y revisión bibliográfica
2. Análisis y síntesis de información
3. Estructura, redacción y elaboración de conceptos
4. Elaboración de textos, figuras y gráficos
5. Elaboración de material didáctico

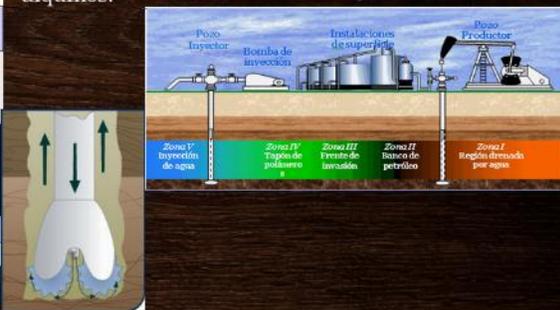
III.- Aplicaciones a la Geología del Petróleo.

La aplicación de la Química se presenta en la exploración petrolera por la composición y uso de los hidrocarburos y en los componentes o materiales producto de la industrialización.



Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.

En función de su calidad y grado de saturación, son clasificados como alcanos, alquenos y alquinos.

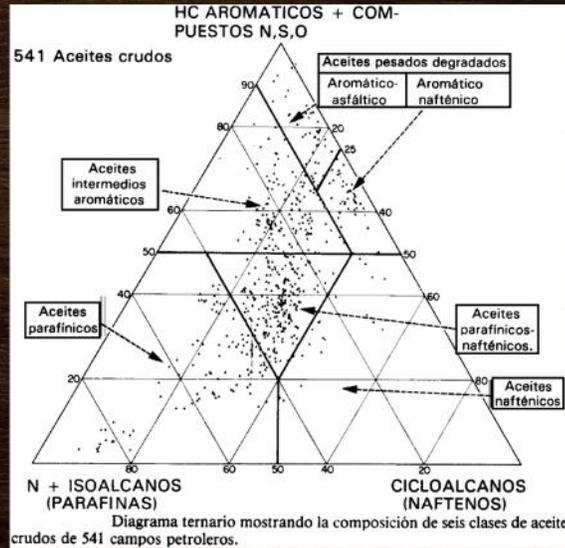


Clasificación de los aceites crudos

Esta se basa en el contenido de alcanos normales e iso-alcanos, cicloalcanos (naftenos) y compuestos aromáticos (bencenos).

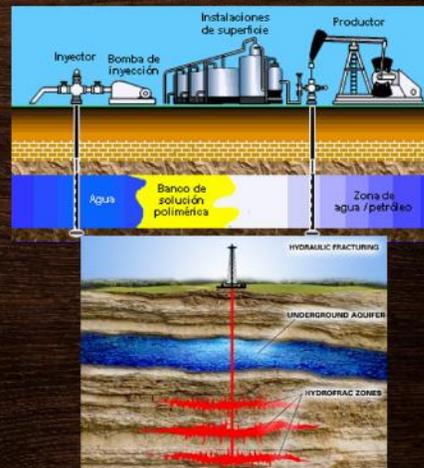
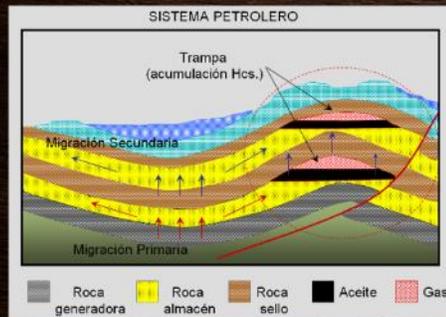
Las principales clases de aceites crudos son:

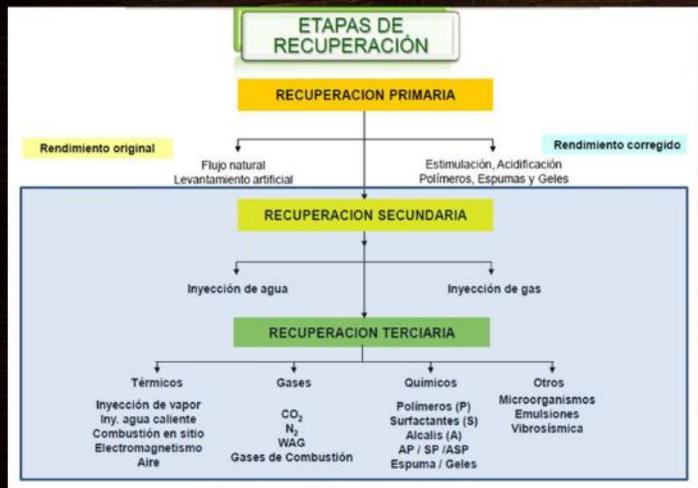
- ACEITES PARAFÍNICOS
- ACEITES PARAFÍNICO - NAFTÉNICOS
- ACEITES AROMÁTICOS INTERMEDIOS



Los hidrocarburos se generan a través de la transformación de plantas y animales (materia orgánica) preservados en las secuencias sedimentarias.

Los hidrocarburos se extraen del subsuelo de yacimientos convencionales y no convencionales.





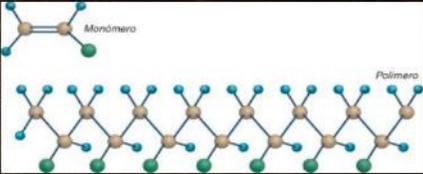
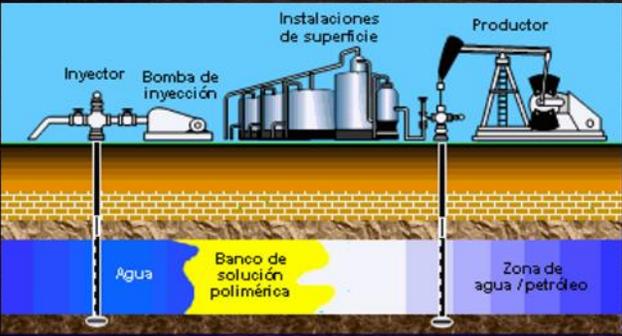
En la recuperación mejorada de hidrocarburos, se han diseñado métodos térmicos y de inyección de agua con productos químicos, buscando mejorar la relación de movilidades entre el aceite y el agua por medio de:

- Inyección de agua viscosa (polímeros).
- Métodos alcalinos.
- Métodos de baja tensión (surfactante).

La finalidad es extraer aceite residual de campos maduros.

Inyección de agua viscosa (polímeros).

Un polímero es un producto químico constituido por macromoléculas en forma de cadenas formadas por moléculas simples, llamadas monómeros. El objetivo de este método es el de incrementar la viscosidad de la fase acuosa y reducir la permeabilidad de la roca porosa al agua, mejorando la eficiencia de desplazamiento. Los polímeros usados en estos procesos se clasifican de manera general en dos tipos: polímeros sintéticos y biopolímeros.



Ejemplo de un polímero y su monómero.

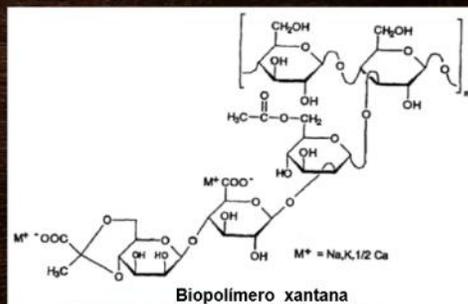
Biopolímeros.

El biopolímero más común es la *Xantana*, se caracteriza por aumentar significativamente la viscosidad del agua con alta salinidad, por su afinidad, ya que el *Xantana* contiene varias partes iónicas que pueden interactuar con los iones disueltos en agua.

El biopolímero Xantana produce flujo anular, lo que se requiere para una elevación eficiente de los recortes de perforación en lodos de densidades inferiores.

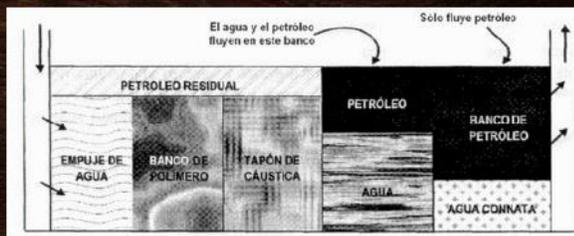
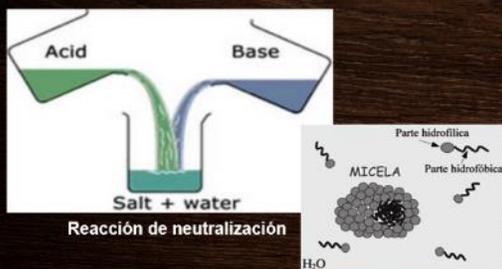


Bacteria xanthomonas campestris



Métodos alcalinos.

Consiste en la inyección en el yacimiento de disoluciones alcalinas, conocidas como bases en química por su pH superior a 7. Los más usados son el hidróxido de sodio (NaOH) y el carbonato de sodio (Na₂CO₃). Estas disoluciones reaccionan con los ácidos orgánicos presentes en los crudos, llevándose a cabo reacciones de neutralización, generando sales surfactantes el objetivo de este método es la disminución en la tensión interfacial entre el agua y el aceite, emulsificación del agua y el aceite y/o solubilización de las películas interfaciales.

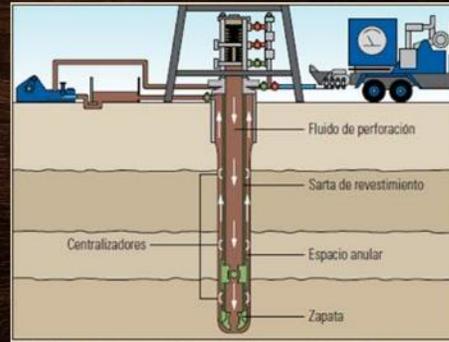
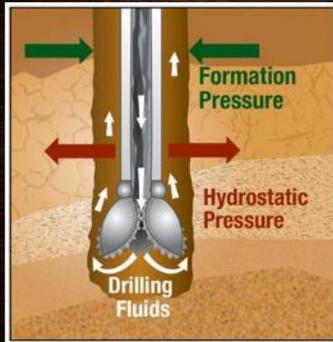


Lodos de perforación.

Se dividen en neumáticos, base agua y base aceite. Intervienen minerales como arcilla ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), galena (PbS), calcita (CaCO_3), barita (BaSO_4), polímeros, entre otros componentes.

Las aplicaciones más importantes son:

- Obtener los recortes de la formación a la superficie.
- Estabilizar las paredes de la formación.
- Controlar las presiones de la formación.
- Enfriar y lubricar la barrena.



IV.- Aplicaciones a la hidrogeología.

El estudio de las propiedades químicas del agua superficial y subterránea y su relación con la geología regional está dada por la hidrogeoquímica.

Los iones fundamentales son:

Cloruro (Cl^-)

Sulfato (SO_4^{2-})

Bicarbonato (CO_3H^-)

Sodio (Na^+)

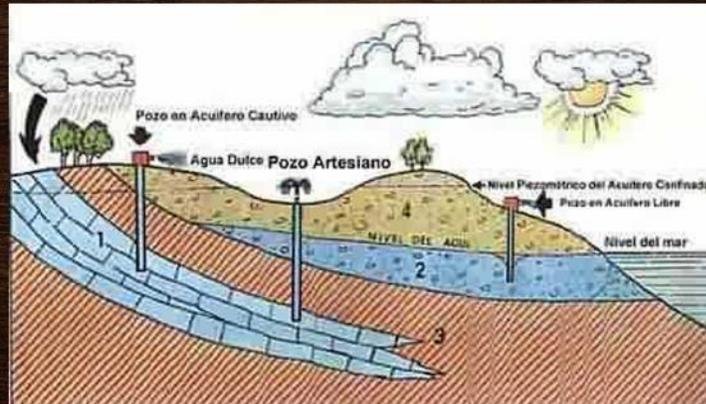
Calcio (Ca^{++})

Magnesio (Mg^{++})

Nitrato (NO_3^-)

Carbonato (CO_3^{2-})

Potasio (K^+)



Calidad del agua en norias.

Proyecto hidrogeológico-geofísico, para localizar el mejor sitio para perforar un pozo que abastezca agua de buena calidad a una comunidad.

Calidad del Agua Subterránea.

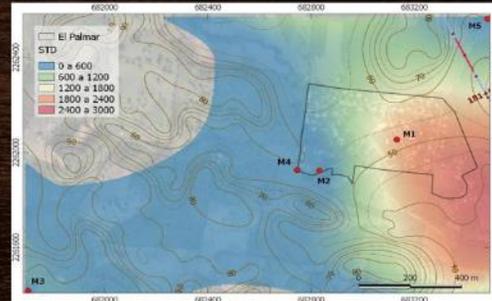
La mayoría de los parámetros se encuentran dentro de la Norma de potabilidad NOM-127, salvo el caso de algunas captaciones en coliformes fecales, coliformes totales, sulfatos, hierro, dureza y nitrógeno orgánico.



PARAMETRO	UNIDAD	norm 127 usa	M1	M2 (1)	M2 (2)	M3	M4	M5
Color real / Color aparente	Upt/Co	20	15/15	10/10	8/-	10/-	8/-	10/-
Olor	-	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro	Inoloro
Turbiedad	NTU	5	<5	<5	0.35	0.3	0.6	0.45
Sabor	-	Agradable	-	-	Agradable	Agradable	Agradable	Agradable
DBO5	mg/L	-	9.12	7.09	3	3	5	6
DOO	mg/L	-	149.89	117.1	-	-	-	-
Sólidos Totales	mg/L	1000	1489	515	438	400	438	390
Cloruro	mg/L	250	111.67	28.04	27.9	23.5	33.8	17.6
Fluoruro	mg/L	1.5	0.9	0.49	-	-	-	-
Sulfatos	mg/L	400	160	17.8	37.8	9.2	28.1	16.1
Aluminio	mg/L	0.2	-	-	0.00906	ND	0.01055	ND
Arsenico	mg/L	0.05	<0.1	<0.01	0.00906	0.00812	ND	0.00794
Cadmio	mg/L	0.005	-	-	ND	ND	ND	ND
Cobre	mg/L	2	<0.05	<0.05	0.01013	0.00821	0.00832	0.00705
Cromo total	mg/L	0.05	<0.05	<0.05	-	-	-	-
Hierro	mg/L	0.3	0.132	0.145	0.06317	0.04356	0.06164	0.0654
Magnesio	mg/L	-	92.6	15.9	7.4	7.3	9.5	7
Manganeso	mg/L	0.15	<0.1	<0.1	0.01026	0.01472	0.01156	0.0437
Mercurio	mg/L	0.001	<0.005	<0.005	ND	ND	ND	ND
Plomo	mg/L	0.025	<0.2	<0.02	ND	ND	ND	ND
Sodio	mg/L	200	157	33.9	34.785	24.625	27.368	18.762
Zinc	mg/L	5	0.062	0.073	0.005	0.00713	0.00132	0.00358
Bario	mg/L	0.7	-	-	0.22937	0.11305	0.0782	0.11604
Cadmio	mg/L	0.005	<0.01	<0.01	ND	ND	ND	ND
Cianuro	mg/L	0.07	-	-	ND	0.0006	0.001	0.0006
SAAM	mg/L	0.5	<0.5	<0.5	0.01	0.01	0.01	0.01
Boro	mg/L	-	0.141	<0.1	-	-	-	-
Potasio	mg/L	-	17.02	1.5	-	-	-	-
Calcio	mg/L	-	493	135	96.9	78.1	77.9	74.6
Acidez	mg/L	-	11.4	13.78	-	-	-	-
Silice	mg/L	-	41.5	28.95	-	-	-	-
Nitrogeno de Nitritos	mg/L	0.05	-	-	0.0034	0.0014	0.0015	0.0007
Nitrogeno de Nitratos	mg/L	10	2.46	0.41	0.2624	0.0077	0.0179	0.0226
Nitrogeno amoniacal	mg/L	0.5	<1	<1	0.0622	0.1038	0.0525	0.1425
Nitrogeno Organico	mg/L	0.1	-	-	-	-	-	-
Dureza Total	mg/L CaCo3	500	1301.8	335.16	364	315	323	313
Dureza de calcio	mg/L CaCo3	-	891.8	292.04	-	-	-	-
Dureza de Magnesio	mg/L CaCo3	-	401.8	43.12	-	-	-	-
Alcalinidad Total	mg/L CaCo3	-	277.2	321.3	345	312	322	299
Bicarbonatos	mg/L CaCo3	-	277.2	321.3	345	312	322	299
Carbonatos	mg/L CaCo3	-	0	0	0	0	0	0
Hidroxidos	mg/L CaCo3	-	0	0	0	0	0	0
Coliformes Fecales	NMP/100ml	ND	90	60	18	18	18	18
Coliformes totales	NMP/100ml	2	90	60	18	18	18	18

Sólidos Totales Disueltos (STD), Buena calidad con respecto de este parámetro (550 ppm en promedio) salvo el caso de la una muestra.

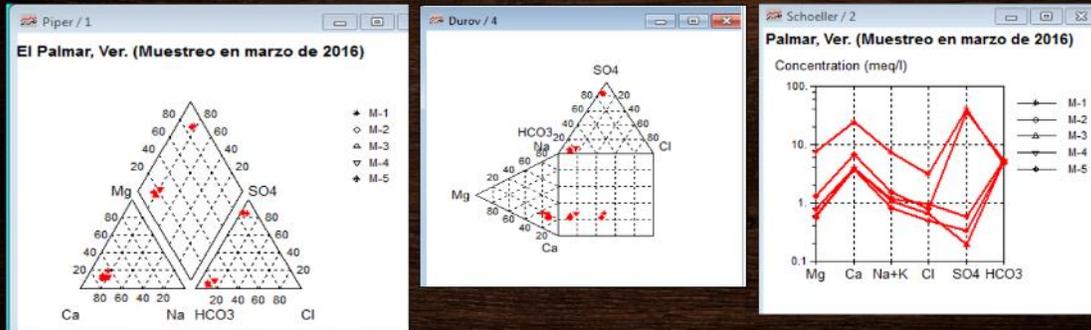
Coliformes Fecales y Coliformes Totales. Prácticamente todos los análisis practicados resultaron por encima de la norma 127.



Isovalores de Sólidos Totales Disueltos en el agua subterránea.

Mediante diagramas indican que el agua subterránea corresponde con la familia cálcica-bicarbonatada y una tendencia cálcico-sulfatadas.

Para el pH, el agua subterránea presenta un promedio de 7.3.

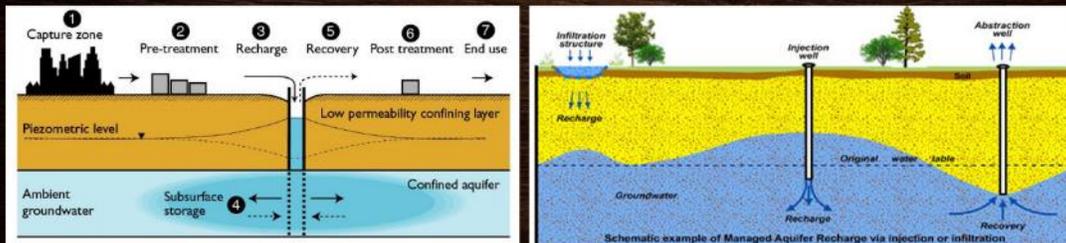


M-1	VERACRUZ, ME FM. TUXPAN	Ca-SO4
M-2	VERACRUZ, ME FM. TUXPAN	Ca-SO4-HCO3
M-3	VERACRUZ, ME FM. TUXPAN	Ca-HCO3
M-4	VERACRUZ, ME FM. TUXPAN	Ca-HCO3
M-5	VERACRUZ, ME FM. TUXPAN	Ca-HCO3

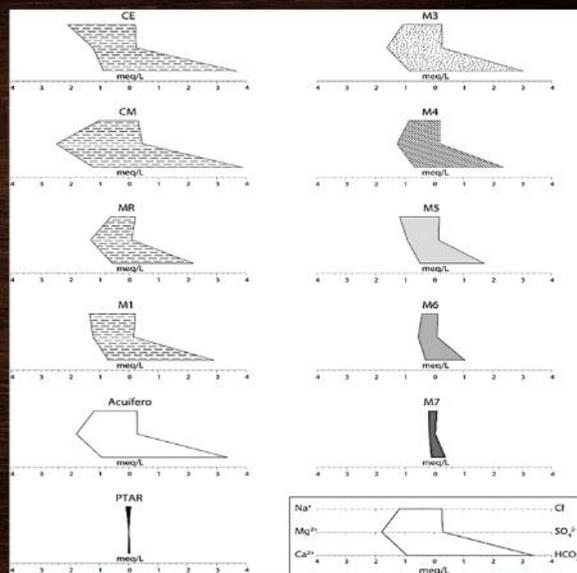
Modelado hidrogeoquímico para recarga gestionada.

La modelación hidrogeoquímica permite evaluar procesos de mezcla, especiación química, índices de saturación, interacción agua-roca y evaluar reacciones entre el agua subterránea nativa y agentes externos.

La recarga gestionada de acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés,) permite aumentar las reservas de agua subterránea y proporciona protección a acuíferos en estrés hídrico.

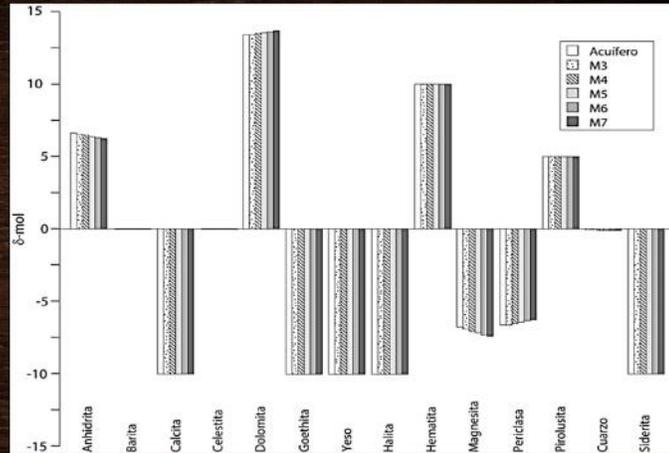


De acuerdo con los polígonos de Stiff, se muestran composiciones magnésicas-bicarbonatadas, y una tendencia sódica-bicarbonatada.



Polígonos de Stiff de los pozos muestreados y mezclas simuladas

Los índices de saturación mostraron los minerales con tendencia a precipitar serán anhidrita (CaSO_4), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), hematita (Fe_2O_3) y pirolusita (MnO_2).



Resultados de la simulación de los índices de saturación

La firma hidrogeoquímica natural del acuífero ($\text{HCO}_3^- - \text{Mg}_2^+$) no se modifica cuando se mezcla con el agua de salida de una planta terciaria. Indica que el agua seguirá siendo apta para consumo humano.

V.- Aplicaciones a la Minería.

Los explosivos en la minería.

Las aplicaciones de la Química en la Minería se presentan cuando se conoce la composición química de los minerales a explotar, en la composición de los explosivos utilizados que permiten explotar los recursos, en los sistemas de evaluación por contaminación, como ocurre con el tratamiento de drenajes ácidos de mina y de otros desechos producto de la explotación y concentración de elementos de interés.

Uno de los explosivos de mayor uso en la minería es el ANFO (Ammonium Nitrate - Fuel Oil). Consiste en una mezcla de nitrato de amonio (NH_4NO_3) y un combustible derivado del petróleo de bajo costo (diesel).



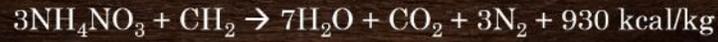
La mayor parte de los componentes de un explosivo están compuestos por los elementos químicos oxígeno (O), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y carbono (C), junto con algunos elementos metálicos como el aluminio (Al), magnesio (Mg), sodio (Na), calcio (Ca), etc.

Tomando en cuenta que la reacción debe oxidar todos los combustibles en él contenidos, el balance de oxígeno resulta vital por lo que la mezcla debe tener suficiente oxígeno para completar la reacción, pero no tanto como para reaccionar con el nitrógeno.



Las consecuencias de contar con un balance de oxígeno se tiene primordialmente en la reducción de la energía liberada. En la industria minera, la mezcla que generalmente se utiliza es de 94% de nitrato de amonio y 6% de diésel.

94.5% AN – 5.5% FO (formulación balanceada)

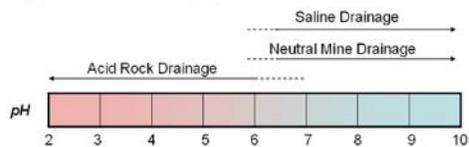


Sistemas de tratamiento de Drenaje Ácido de Mina.

En presencia de agua y oxígeno se llevan a cabo reacciones de óxido-reducción en las que se oxida el azufre de los minerales para formar sulfatos (SO_4^{2-}) y liberar protones (H^+) que dan la acidez al agua. El DAM se caracteriza por tener $\text{pH} < 5$, su alto contenido de sólidos suspendidos, así como por presentar en solución metales pesados, metaloides y sulfatos.



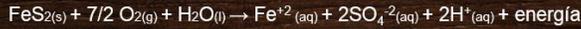
Typical relation to drainage pH:



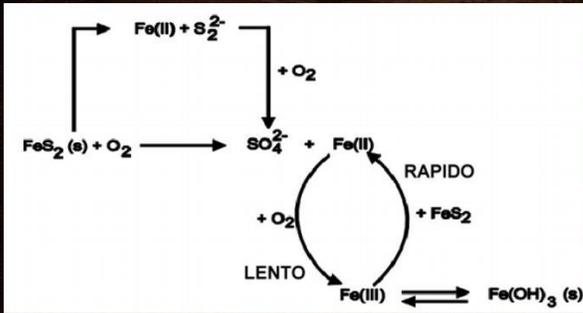
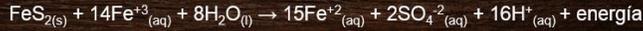
Typical drainage characteristics:

Acid Rock Drainage:	Neutral Mine Drainage:	Saline Drainage:
<ul style="list-style-type: none"> acidic pH moderate to elevated metals elevated sulphate treat for acid neutralization and metal and sulphate removal 	<ul style="list-style-type: none"> near neutral to alkaline pH low to moderate metals. May have elevated zinc, cadmium, manganese, antimony, arsenic or selenium. low to moderate sulphate treat for metal and sometimes sulphate removal 	<ul style="list-style-type: none"> neutral to alkaline pH low metals. May have moderate iron moderate sulphate, magnesium and calcium treat for sulphate and sometimes metal removal

Los minerales que más favorecen la generación de DAM son los sulfuros de hierro, siendo la pirita el principal generador de DAM.



La reacción produce ion ferroso (Fe^{+2}) en solución, sulfatos que aumentan los sólidos disueltos totales, e iones hidrógeno que acidifican el agua. El ion ferroso a su vez se oxida a ion férrico, el cual también actúa como agente para oxidar la pirita y producir más ion ferroso, sulfatos e iones hidrógeno.

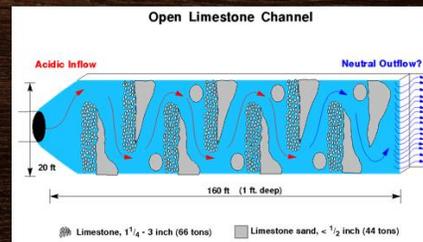
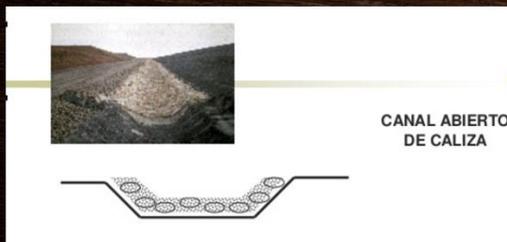
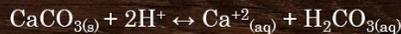


Los sistemas de tratamiento de DAM requieren del uso de algún reactivo alcalino como carbonato de calcio (CaCO_3), carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de sodio (NaOH), óxido de calcio (CaO) e hidróxido de calcio (Ca(OH)_2); también se utilizan materiales naturales.

La roca caliza, por su alto contenido de calcita (CaCO_3) ha sido ampliamente utilizada. La disolución de la calcita produce iones bicarbonato (HCO_3^-) o ácido carbónico (H_2CO_3).

Los carbonatos juegan el papel más importante en el proceso de neutralización del drenaje ácido; minerales como calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe,Mg})(\text{CO}_3)_2$) o magnesita (MgCO_3) son consumidores de la acidez del agua.

La disolución de la calcita produce iones bicarbonato (HCO_3^-) o ácido carbónico (H_2CO_3), según las condiciones del medio, ligeramente ácidas a alcalinas o fuertemente ácidas, respectivamente:



Neutralización de Drenaje Ácido de Mina en México.

José Enrique Santos Jallath presenta un sistema de tratamiento en celdas con el uso de rocas carbonatadas, para la neutralización del DAM que se genera en una Mina de México en la que se explota un yacimiento de sulfuros masivos de Zn- Pb-Cu con valores de Ag y Au.



La presencia de roca filita grafitica asociada al yacimiento, con importante contenido de calcita (CaCO_3), así como de roca caliza que aflora cerca de la mina, hacen posible considerar su uso en un sistema de tratamiento pasivo.

Los valores de pH que se midieron directamente en los sitios donde se genera DAM van de 2.43 a 3.05. Por su nivel de pH, el agua puede considerarse como fuertemente ácida. Se tomaron muestras de roca dentro de la mina, de roca filita grafitica y de esquisto de sericitia. Y fuera de la mina se tomó una muestra de roca caliza.

En todos los casos en los que se utilizó la filita y caliza se logró incrementar el pH inicial de la solución (2.58 – 2.91) a valores neutros o cercanos al neutro (5.36 – 7.96).

El análisis de las soluciones después de la neutralización muestra que hay remoción de Al y Fe a partir de valores de pH de 4.3, y de Cu a partir de valores de 5.

Concentraciones de elementos traza después de los pasos de agitación

Concentración de elementos traza en las muestras de drenaje ácido

Muestra	pH	EC (mS)	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Si	Zn
Arroyo	7.38	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	9.25	<LD
DA 6	2.44	11.31	41.0	5.8	11.6	562.9	41.1	35.4	482.9
DA 6 - A	2.53	8.02	36.4	5.1	12.1	527.1	37.0	32.0	470.6
Pileta	2.90	4.72	8.6	2.3	2.5	178.4	25.8	16.6	363.3
DA 8	3.38	1.87	<LD	0.2	<LD	0.3	3.8	8.0	77.1

LD (mg/L): Al (0.08), Cd (0.02), Cu (0.12), Fe (0.01), Mn (0.02), Si (0.03) y Zn (0.01)

1er Paso de Agitación

Muestra	pH	Al mg/L	Fe mg/L	Cu mg/L
DA-P1	2.74	18.99	111.88	2.29
PF1	6.64	<LOD	<LOD	<LOD
PF2	5.00	<LOD	<LOD	<LOD
PF2-D	6.67	<LOD	<LOD	<LOD

LD (mg/L): Al (0.08), Fe(0.01), Cu (0.122)

1er Paso de Agitación

Muestra	pH	Cd mg/L	Mn mg/L	Zn mg/L
DA-P1	2.74	2.19	23.14	319.68
PF1	6.64	1.29	15.60	205.47
PF2	5.00	<LOD	19.68	258.61
PF2-D	6.67	2.17	25.96	311.44

LD (mg/L): Cd (0.02), Mn (0.007), Zn (0.007)

Los valores de pH que se midieron directamente en los sitios donde se genera DAM van de 2.43 a 3.05. Por su nivel de pH, el agua puede considerarse como fuertemente ácida. Se tomaron muestras de roca dentro de la mina, de roca filita grafitica y de esquisto de sericitia. Y fuera de la mina se tomó una muestra de roca caliza.

En todos los casos en los que se utilizó la filita y caliza se logró incrementar el pH inicial de la solución (2.58 – 2.91) a valores neutros o cercanos al neutro (5.36 – 7.96).

El análisis de las soluciones después de la neutralización muestra que hay remoción de Al y Fe a partir de valores de pH de 4.3, y de Cu a partir de valores de 5.

Concentraciones de elementos traza después de los pasos de agitación

Concentración de elementos traza en las muestras de drenaje ácido

Muestra	pH	EC (mS)	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Si	Zn
			mg/L						
Arroyo	7.38	0.07	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	9.25	<LD
DA 6	2.44	11.31	41.0	5.8	11.6	562.9	41.1	35.4	482.9
DA 6 - A	2.53	8.02	36.4	5.1	12.1	527.1	37.0	32.0	470.6
Pileta	2.90	4.72	8.6	2.3	2.5	178.4	25.8	16.6	363.3
DA 8	3.38	1.87	<LD	0.2	<LD	0.3	3.8	8.0	77.1

LD (mg/L): Al (0.08), Cd (0.02), Cu (0.12), Fe (0.01), Mn (0.01), Si (0.01) y Zn (0.01)

1er Paso de Agitación

Muestra	pH	Al	Fe	Cu
		mg/L	mg/L	mg/L
DA-P1	2.74	18.99	111.88	2.29
PF1	6.64	<LOD	<LOD	<LOD
PF2	5.00	<LOD	<LOD	<LOD
PF2-D	6.67	<LOD	<LOD	<LOD

LD (mg/L): Al (0.08), Fe(0.01), Cu (0.122)

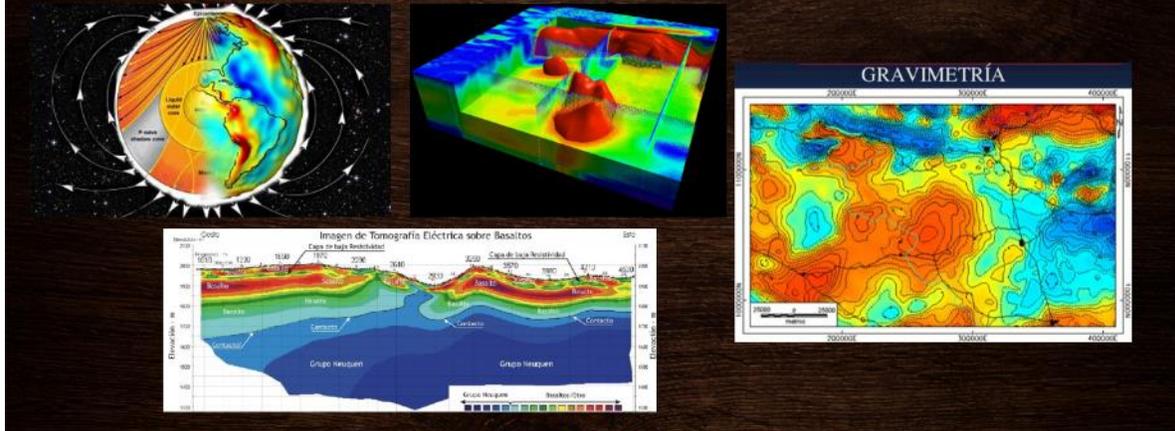
1er Paso de Agitación

Muestra	pH	Cd	Mn	Zn
		mg/L	mg/L	mg/L
DA-P1	2.74	2.19	23.14	319.68
PF1	6.64	1.29	15.60	205.47
PF2	5.00	<LOD	19.68	258.61
PF2-D	6.67	2.17	25.96	311.44

LD (mg/L): Cd (0.02), Mn (0.007), Zn (0.007)

VI.- Aplicaciones a los Métodos Geofísicos.

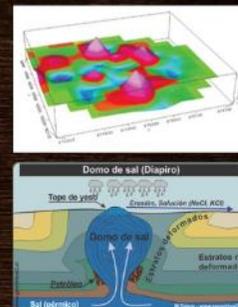
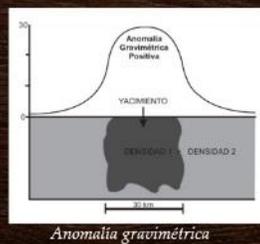
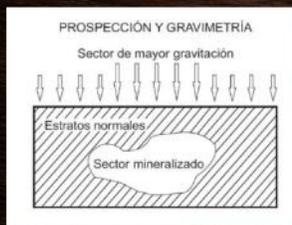
La Geofísica fundamenta sus estudios, en la utilización de las propiedades físicas de los cuerpos de roca que constituyen el subsuelo terrestre, el análisis y la interpretación de dichas propiedades proveen imágenes y datos que permiten inferir estructuras geológicas, composición química de las rocas, ubicación de recursos y distribución de propiedades petrofísicas.



Métodos gravimétricos.

Los materiales de alta densidad tales como: hierro, plomo, zinc, etc. producen anomalías positivas; mientras que las acumulaciones salinas producen anomalías negativas, dada su baja densidad.

La gravimetría tiene aplicaciones importantes en la búsqueda de depósitos minerales, detección de cuerpos salinos como diapiros y domos salinos, localización de cavidades subterráneas, localización y cuantificación de estructuras diapíricas de materiales salinos.

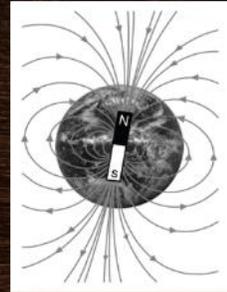
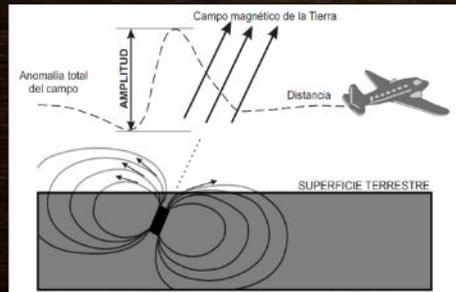


Métodos magnetométricos.

Este método geofísico utiliza el campo magnético que afecta a los yacimientos que contienen magnetita ($\text{Fe}_2(\text{Fe}_{3+})_2\text{O}_4$).

La aplicación de este método se tiene en la exploración minera, petrolera, arqueología, aguas subterráneas. En las exploraciones mineras se aplica el método magnético en la búsqueda directa de minerales magnéticos y en la búsqueda de minerales no magnéticos asociados con los minerales, que ejercen un efecto magnético mensurable en la superficie terrestre.

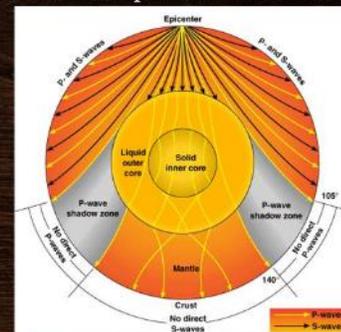
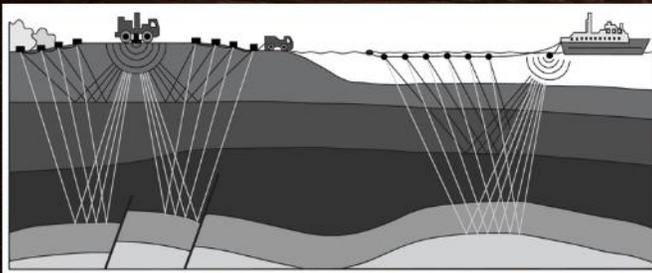
En los yacimientos de tipo Pórfidos Cupríferos, el método es utilizado en la búsqueda de cuerpos intrusivos principalmente granito y monzonita, rocas con alto contenido de magnetita e ilmenita.



Métodos sísmicos.

Para la aplicación del método es necesario generar un sismo artificial mediante dispositivos que controlan la energía. Se detectan los movimientos, se mide el tiempo en que regresan a la superficie después de su propagación en el subsuelo por medio de ondas.

Gracias a los métodos sísmicos, se pudo determinar que la Tierra está formada por diversas capas de distinta densidad y composición, definiendo el núcleo en interno, externo, manto y corteza. El núcleo interno es interpretado como una esfera sólida y viscosa de composición, principalmente, de Níquel y Hierro, mientras el núcleo externo es interpretado como una zona líquida de Hierro.

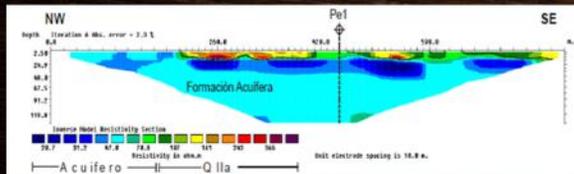


Métodos eléctricos.

Los métodos eléctricos utilizan la medición en campos eléctricos o electromagnéticos para investigar las características estructurales, yacimientos minerales, composición química de los materiales.

Encontramos su aplicación en la industria minera en yacimientos de sulfuros metálicos en forma diseminada como Pórfidos Cupríferos, yacimientos en Stock Work, en la prospección de estructuras tabulares que contengan sulfuros y en cuerpos masivos de Magnetita.

También se utilizan para la investigación de agua, debido a que las rocas que contienen agua son más conductoras que las que no la contienen.



Tipo de agua	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Agua pura	0,04 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua destilada	0,5 a 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua de lluvia	5 a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Aguas potables	<2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Aguas salobres	2500 -20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Aguas de mar	45000-55000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Salmueras	>100000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Conclusiones.

Este material didáctico aporta información relevante y de utilidad a los estudiantes de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ya que cuenta con aplicaciones de la Química en Geología del Petróleo, hidrogeología, minería y métodos geofísicos. Los estudiantes contarán de manera más directa con material que será de beneficio para mejorar su desempeño en su carrera estudiantil y al egresar en su desarrollo profesional en el ámbito laboral.

En Geología del Petróleo es indispensable el uso y comprensión de la Química en la composición y uso de hidrocarburos, así como en los componentes o materiales que se usan en la exploración y explotación, por ejemplo en los lodos de perforación y las sustancias que se utilizan en su recuperación en sus distintas fases.

En hidrogeología, la Química tiene su principal aplicación en la hidrogeoquímica, ya que con ella se estudian las propiedades químicas del agua superficial y subterránea, se analizan los iones disueltos en agua, los procesos de interacción agua-sólido, su circulación, entre otros. La modelación hidrogeoquímica permite evaluar procesos de mezcla, especiación química, índices de saturación y transporte reactivo entre diferentes componentes y establecer la compatibilidad hidrogeoquímica entre el agua subterránea nativa y el agua de recarga como de una planta de tratamiento.

En la minería, la Química está presente en la explotación, la metalurgia, como ejemplo, en las reacciones que tienen que ver con los combustibles de los explosivos, controlando el balance de oxígeno para que la mezcla tenga suficiente oxígeno para completar la reacción.

En la generación de Drenaje Ácido de Mina se aplican sistemas de tratamiento que utilizan materiales químicos naturales, como rocas carbonatadas, plantas, materia orgánica y/o microorganismos. El uso de algún reactivo alcalino permite elevar el pH de la solución y remover elementos traza por precipitación.

Las aplicaciones de la Química en los métodos geofísicos se realizan en la ciencia pura y en la Ingeniería aplicada, particularmente en la exploración minera, petrolera, así como en la búsqueda de agua y vapor de agua en el subsuelo y en los estudios de impacto ambiental.

El conocimiento de Química ayuda a la comprensión de cada una de las aplicaciones descritas con la práctica de cada carrera de Ciencias de la Tierra, teniendo como consecuencia un aprendizaje significativo en los estudiantes, una mayor motivación, la buena acreditación de la asignatura de Química para Ciencias de la Tierra y a los egresados el buen desarrollo profesional laboral.