



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Fracturamiento
Electromagnético en
Formaciones Arcillosas**

ARTÍCULO ACADÉMICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Mario Ubaldo Rangel Gutiérrez

ASESOR(A) DE ARTÍCULO ACADÉMICO

Dr. Fernando Samaniego

Verduzco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



JULIO-AGOSTO 2019, VOL. 59, NÚM.4



Contenido

206-232 Fracturamiento electromagnético en formaciones arcillosas

*Mario Ubaldo Rangel Gutiérrez
Nelson Barros Galvis
Fernando Samaniego Verduzco*

233-254 Prueba de presión en un pozo con penetración parcial, ubicado en un domo con geometría fractal

*Ricardo Posadas Mondragón
Rodolfo Gabriel Camacho Velázquez*

255-261 Interpretación elástica, mecánica, litológica e intervalos productores de pozos no convencionales: “shale gas” y “tight oil” mediante plantillas ternarias de física de rocas

*Rubén Nicolás López
Aurelio España Pinto
Oscar Valdiviezo Mijangos
Jaime Meléndez Martínez
Alfredo López Lena Estrada*

262-286 Estimación de volúmenes originales durante fase de expansión: Casos Abkatun-Pol-Chuc y Complejo Antonio J. Bermúdez

*José María Petríz Munguía
Jorge Morales
Blanca Estela González Valtierra*



Foto de portada: cortesía de Pemex.

Directiva Nacional 2018-2020

Presidente
Vicepresidente
Secretario
Tesorero
Coordinador de Ayuda Mutua
Coordinador Nacional de Fondo de Retiro
Director de la Comisión de Estudios
Director de la Comisión Editorial
Director de la Comisión Legislativa
Director de la Comisión de Membresía

Dr. Néstor Martínez Romero
Ing. Miguel Ángel Lozada Aguilar
Ing. Cuauhtémoc César Zapata González
Ing. José Antonio Ruiz García
Ing. Benito Mendoza Parra
Ing. Miguel Ángel Granados Cruz
Dr. Faustino Fuentes Nucamendi
Ing. Pedro José Carmona Alegría
Ing. Miguel Ángel Méndez García
Ing. José Luis Chávez Suárez

Presidentes Delegacionales 2019-2021

Delegación Ciudad del Carmen
Ing. Marcos Torres Fuentes

Delegación Coahuila
Ing. José Luis Ledesma Otero

Delegación Comalcalco
Ing. Haroldo Sánchez Cortés

Delegación México
Lic. Mauricio Omar Ferrel Ramírez

Delegación Monterrey
Ing. Francisco Valencia Tapia

Delegación Poza Rica
Ing. Jorge Morales Cerón

Delegación Reynosa
Ing. Arturo Ocampo Figueroa

Delegación Tampico
Ing. Jesús Miguel Cruz Garrido

Delegación Veracruz
Ing. Enoc Fernández Sánchez

Delegación Villahermosa
Ing. Manuel de Jesús Coronado Zárate

Revista Ingeniería Petrolera

Coordinación Editorial

Ing. Pedro José Carmona Alegría
Laura Hernández Rosas

comision.nacional.editorial@aipmac.org.mx
lhernandezr@aipmac.org.mx

Consejo Editorial

Roberto Aguilera
University of Calgary

Víctor Hugo Arana Ortiz
Universidad Nacional Autónoma de México

Jorge Alberto Arévalo Villagrán
Universidad Nacional Autónoma de México

José Luis Bashbush Bauza
Schlumberger

Thomas A. Blasingame
Texas A&M University

Rodolfo Gabriel Camacho Velázquez
Universidad Nacional Autónoma de México

Héber Cinco Ley
Universidad Nacional Autónoma de México

Erik Luna Rojero
Instituto Mexicano del Petróleo
Universidad Nacional Autónoma de México

Faustino Fuentes Nucamendi
Petróleos Mexicanos

Néstor Martínez Romero
Comisión Nacional de Hidrocarburos

Michael Prats
Consultor EUA

Fernando J. Rodríguez de la Garza
Universidad Nacional Autónoma de México

Fernando Samaniego Verduzco
Universidad Nacional Autónoma de México

Francisco Sánchez Sesma
Universidad Nacional Autónoma de México

César Suárez Arriaga
Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo

César Treviño Treviño
Universidad Nacional Autónoma de México

Jaime Urrutia Fucugauchi
Universidad Nacional Autónoma de México

Surendra Pal Verma Jaiswal
Universidad Nacional Autónoma de México

Fernando Ascencio Cendejas
Petróleos Mexicanos

Lic. Franco Vázquez
Asistencia técnica

Fracturamiento electromagnético en formaciones arcillosas

Mario Ubaldo Rangel Gutiérrez

Nelson Barros Galvis

Fernando Samaniego Verduzco

Artículo recibido en febrero de 2019 y aceptado en abril de 2019

Resumen

Este artículo propone y desarrolla los fundamentos y el modelo físico-matemático del fracturamiento electromagnético, aplicado a formaciones arcillosas.

Esta propuesta tiene como objetivo la derivación de un modelo físico-matemático, considerando la frecuencia de resonancia de las rocas arcillosas. Por tanto, se requiere la caracterización estática de las arcillas para la generación de las fracturas inducidas mediante un campo electromagnético.

Se presenta un modelo matemático por medio del cual, se concluye que sí es posible desarrollar el fracturamiento electromagnético, para ello, se realizaron pruebas iniciales con fuentes electromagnéticas: magnetrones de hornos de microondas, además, se discuten evidencias reportadas en la literatura.

Palabras clave: Fracturamiento electromagnético, formaciones arcillosas, fracturas inducidas, resonancia.

Electromagnetic fracturing applied to clay formations

Abstract

This paper proposes and develops the physics and mathematical models for electromagnetic fracturing, applied to clay formations.

This work has as objective to develop a physical and mathematical model, considering the resonance frequency of clay rocks. Therefore, is required the static characterization of clay, to generate induced fractures with magnetic field.

A mathematical model is presented, wich has allowed to conclude that it is possible to develop electromagnetic fracturing; thus, initial demonstration was made with electromagnetic sources: microwave magnetrons, and reported demonstrations in the literature are discussed.

Keywords: electromagnetic fracturing, clay formations, induced fractures, resonance.



Introducción

La generación de fracturas inducidas en la formación estimula al yacimiento y aumenta el flujo de los hidrocarburos.

La estimulación del yacimiento se orienta a incrementar la permeabilidad y conectar los canales de flujo existentes. El fracturamiento electromagnético propone y tiene como objetivo, que el medio poroso esté comunicado para la producción de los hidrocarburos al pozo.

El fracturamiento electromagnético ha tenido su desarrollo desde 1959 en la antigua Unión Soviética (Varzin, 1959), donde se fracturaron rocas al inducirles OEM (ondas electromagnéticas). Continuando su desarrollo hasta ahora con el uso de microondas y el fracturamiento por efectos térmicos (Fain Liu, 2014).

El fracturamiento electromagnético no ocasiona problemas ambientales al diferenciar las propiedades electromagnéticas en cada formación, por lo tanto, no contamina los acuíferos, ni habrá inyección de químicos.

Las propiedades electromagnéticas de la formación dependen de su contenido mineralógico; y la fractura

electromagnética inducida depende de los minerales y de su frecuencia natural de resonancia.

Estado del arte del fracturamiento y ondas electromagnéticas

Fracturas y su clasificación

El fracturamiento es la ruptura inducida del medio poroso. Implica la generación de una fractura artificial y su propagación hasta que se alcance un nuevo estado de equilibrio, (Aubinet y Arias, 1991).

El estudio de la dislocación investiga tanto la deformación, como la formación de fracturas artificiales en la roca. El segundo es el que compete a este artículo, y para ello, se analiza el estado tensional triaxial o volumétrico.

El estado triaxial de esfuerzos, **Figura 1**, o volumétrico, se compone de los esfuerzos normales y tangenciales, dentro de los que se tienen máximos, intermedios y mínimos. Transmitidos a lo largo de los ejes principales. En la Figura 1, se observan los esfuerzos normales máximo, intermedio y mínimo (σ_2 , σ_1 , σ_3) respectivamente:

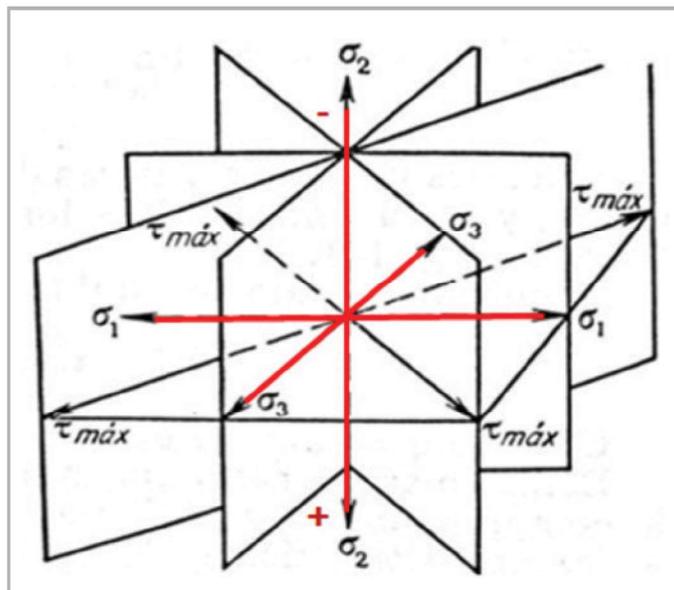


Figura 1. Estado triaxial de esfuerzos [σ_2 , σ_1 , σ_3] y tensiones [τ]. Belousov, 1979, pág. 28.

Los estudios geomecánicos determinan la dirección y magnitud de: σ_1 , σ_2 , σ_3 y τ_{max} , lo cuales son de utilidad para determinar la magnitud y dirección de las fracturas inducidas.

El modelo de Anderson (Niemeyer, 1999) clasifica las fallas de acuerdo a su dinámica, basada en la posición de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 , σ_3 ortogonales entre sí, los cuales dependen de las propiedades geomecánicas: en las Ecs. 1-3 se presentan los sistemas.

$$\text{Sistema Normal: } \sigma_2 \geq \sigma_1 \geq \sigma_3 \tag{1}$$

$$\text{Sistema Transcurrente: } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \tag{2}$$

$$\text{Sistema Inverso: } \sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2 \tag{3}$$

Según la posición de la falla en el cuerpo es su clasificación, desde el punto de vista de la mecánica de fractura:

- Fracturas de tensión (I).
- Fracturas de cizalla (II y III).

Fracturas de tensión (I). Movimiento perpendicular a la superficie de la fractura, **Figura 2A**.

Fracturas de cizalla (II). Movimiento paralelo a la superficie de fractura y perpendicular al borde de propagación, **Figura 2B**.

Fracturas de cizalla (III). Movimiento paralelo a la superficie de fractura y al borde de propagación, **Figura 2C**.

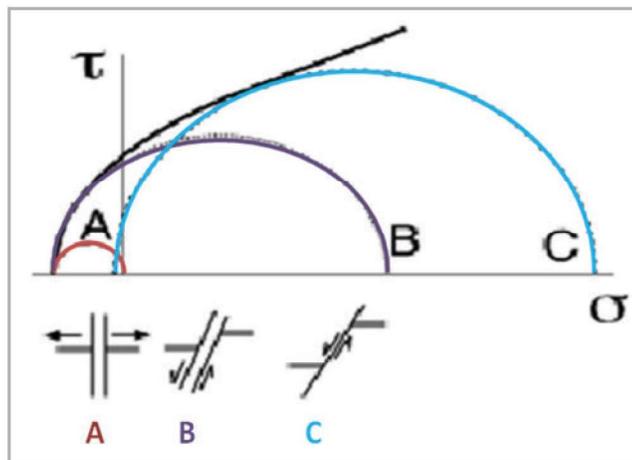


Figura 2. Comportamiento de corte contra el esfuerzo normal usando el círculo de Mohr, el cual es un método gráfico que determina el estado tensional en un cuerpo, cada punto representa el par de esfuerzos (σ y τ) en el plano, e indica el tipo de fractura: fracturas de tensión A, fracturas de cizalla II B, fracturas de cizalla III C.

Una fractura inducida provocada por esfuerzos tensiles, tiene un comportamiento mecánico similar al de una falla, el cual, se genera por esfuerzos tangenciales o de corte. Al resonar los materiales dentro del medio poroso interactúan con los esfuerzos tangenciales o de corte, que al sobrepasarse, inducen una fractura.

Onda y función de onda

Una onda es la propagación de la perturbación en un medio, esto implica el transporte de energía de un punto a otros (generalmente radial), sin un transporte de materia en la trayectoria.

Mencionando las dos más comunes

- Ondas longitudinales. La perturbación ocurre en la dirección paralela a la propagación.
- Ondas transversales. La perturbación ocurre en dirección perpendicular a la propagación.

La ecuación de onda debe satisfacerse por la función $f(r,t)$, la cual describe el comportamiento dinámico de la onda en función del espacio y tiempo, **Ec. 4**:

$$\nabla^2 f(r,t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f(r,t)}{\partial t^2} + \kappa \frac{\partial f(r,t)}{\partial t} \quad (4)$$

La onda electromagnética viaja de manera radial a través del medio poroso en función del tiempo, transportando energía.

Las ondas electromagnéticas se atenúan dependiendo del medio a través del cual se propagan por factores óhmicos y por dispersión de la radiación.

Ecuaciones de Maxwell:

Para generar una onda electromagnética se deben satisfacer simultáneamente las **Ecs. 4, 5, 6, 7 y 8**.

$$\nabla \circ D = \rho \quad (5)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \circ B = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (8)$$

La solución a las ecuaciones de Maxwell para una onda que viaja en un medio con pérdidas (medio poroso) para una onda plana a través del eje z es (**Hayt y Buck, 2011**):

$$E = E_{max} e^{-\alpha z} e^{j(-\beta z + \omega t)} \quad (9)$$



Se entiende al eje z como de propagación, donde α es el coeficiente de atenuación y β constante de propagación.

Estas “constantes” son importantes para determinar la atenuación y propagación de las OEM, **Ecs. 10 y 11:**

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1} \quad (10)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1} \quad (11)$$

Por medio de la constante de atenuación se puede determinar la penetración de las ondas en un medio material, por medio de la **Ec. 12:**

$$P_D = 1/2 \alpha \quad (12)$$

La atenuación de las ondas es un factor importante al momento de viajar a través del medio poroso por la pérdida de energía asociada.

Las ondas electromagnéticas pasarán por un punto a un tiempo determinado, lo anterior se conoce como frecuencia de la onda y se denota por medio de la **Ec. 13:**

$$f = v / \lambda \quad (13)$$

La materia posee una frecuencia natural que depende del material y de su geometría (forma y dimensión). Un cuerpo entra en resonancia cuando la frecuencia de excitación senoidal coincide con alguna de las frecuencias naturales del objeto. Por ejemplo, las ondas electromagnéticas al inducirse con una frecuencia específica sobre el medio poroso, generan la resonancia de materiales particulares.

Piezolectricidad

La piezolectricidad es la capacidad que tiene un material para transformar la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa, **Figura 3**. Se advierte que la capacidad de polarización se afecta por efectos de temperatura conocida como temperatura de Curie con un valor de 300 [°C] para cerámicas.

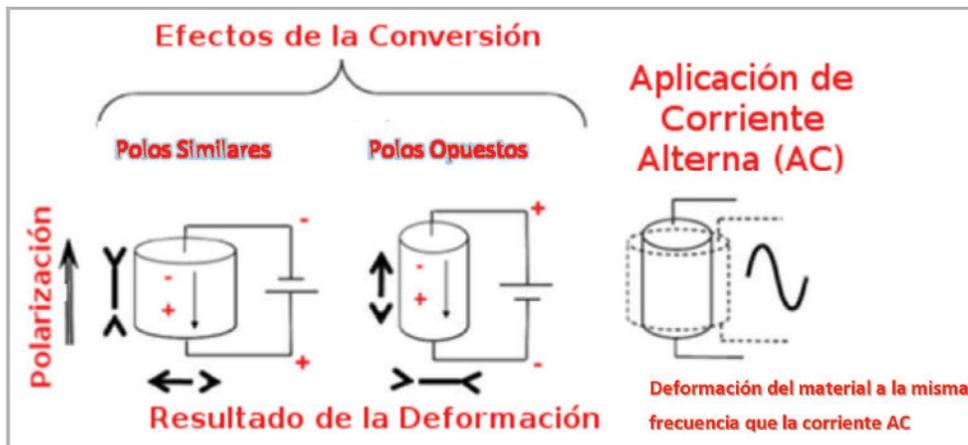


Figura 3. Material piezoeléctrico sometido a deformación, generándose energía eléctrica con el uso de electrodos (Özgen, 2015).

El uso de electrodos obedece a los altos espesores en los cristales de SiO_2 , ya que su arreglo molecular es complejo, a continuación en la **Figura 4** se ilustra un octaedro de SiO_2 que es la unidad molecular fundamental en estos cristales.

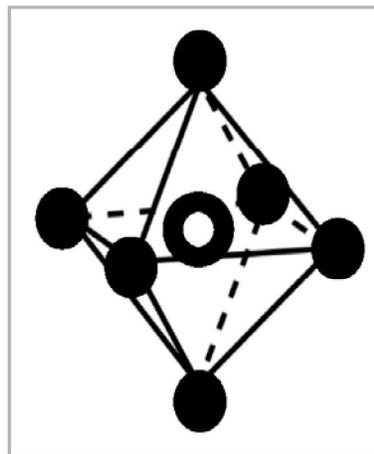


Figura 4. Molécula de SiO_2 , unidad fundamental de los cristales, idealizado a un octaedro regular.

Los cristales de cualquier piezoeléctrico no son ideales cuando el espesor es grande (respecto al tamaño de sus moléculas), ya que pueden tener diversos arreglos (bilaminar, trilaminar, etc), e impurezas asociadas.

Incluso hay normas para la fabricación de cristales de piezoeléctricos que ayudan al fabricante a colocar electrodos en puntos específicos del cristal, dependiendo del corte, **Figura 5**.

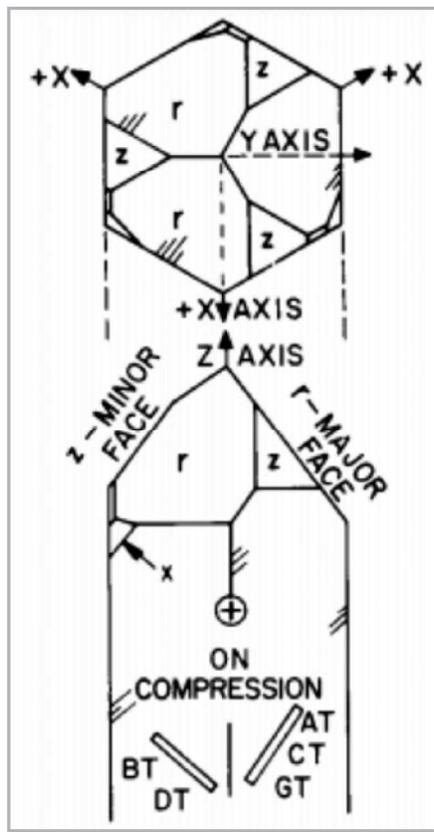


Figura 5. Tipos de corte (BT, DT, AT, CT, GT) para un cristal dependiendo del ángulo respecto a los ejes fijados, para asegurar homogeneidad en el arreglo molecular. (IEEE Standard on Piezoelectricity, 1988).

La complejidad para conocer el arreglo molecular en espesores grandes es alta, ya que se tiene diversos casos suponiendo un material puro, **Figura 6.**

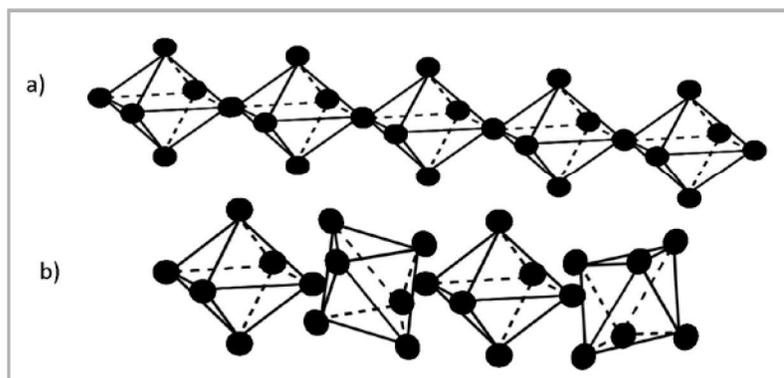


Figura 6. a) Moléculas bien ordenadas del piezoeléctrico por cristalización homogénea, b) moléculas con orden azaroso por cristalización heterogénea.

En cristales pequeños el orden de las moléculas no es un tema de preocupación, pero al incrementarse su volumen, se debe de considerar la cristalización (orden de las moléculas), aparecen unidades que no resonarán porque se anularán con otras dependiendo de su homogeneidad y pureza, **Figura 7.**

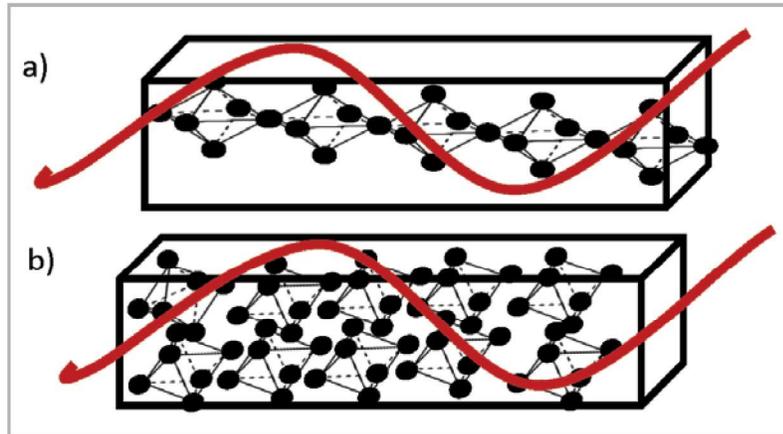


Figura 7. a) Ondas EM inducidas en un cristal puro homogéneo, b) Ondas EM inducidas en un cristal puro heterogéneo.

Las impurezas en un cristal también modifican la forma en la que reacciona, porque el volumen impuro no reaccionará por no ser un piezoeléctrico, **Figura 8.**

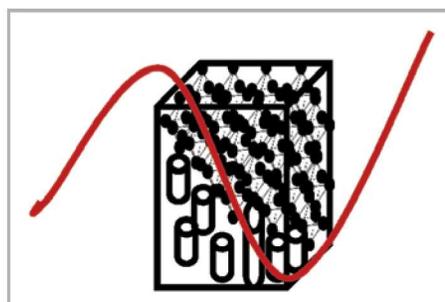


Figura 8. Ondas EM inducidas en un cristal con impurezas. La porción pura resonará pero modificará su comportamiento por la presencia de materiales no dieléctricos.

Debe entenderse que el uso de electrodos no es la única forma de hacer resonar un cristal, puesto que los cristales no son conductores, son dieléctricos, y se usan electrodos para inducir un campo eléctrico, efecto que también se puede obtener con el uso de ondas EM, Lee, 1988, discute en relación al efecto de las ondas electromagnéticas en un cristal de cuarzo con corte AT. El problema con el uso de las ondas EM es que debe usarse en cristales con espesores pequeños como se ha discutido anteriormente.

El medio poroso contiene cadenas de SiO_2 y otros materiales piezoeléctricos, los cuales, al ser sometidos al campo electromagnético, generan vibración por deformación que interactúa con los esfuerzos tensiles, los cuales al sobrepasarse, inducen la fractura.

Las ecuaciones que rigen la piezoelectricidad se expresan por medio de las Ecs. 14 – 16:

$$P = Zd + \epsilon_0\chi E ; e = Zs + Ed \tag{14}$$

$$d = \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_E = \left(\frac{\partial e}{\partial E}\right)_z \tag{15}$$

$$g = \left(\frac{-\partial E}{\partial z}\right)_P = \left(\frac{\partial z}{\partial E}\right)_e \tag{16}$$

Estas ecuaciones describen la polarización que existe dentro de un material, así como su relación con las tensiones mecánicas, las cuales están en función de la susceptibilidad eléctrica y permitividad del material.

Se advierte entonces que en la aplicación de un campo eléctrico en la roca producirá tensión mecánica a nivel microscópico en toda su estructura, donde haya presencia de materiales piezoeléctricos.

Los valores de los coeficientes de deformación piezoeléctrica del SiO_2 , dependen del análisis tensorial en 3D, **Figura 9**, éstos determinan la deformación que presenta el material al inducirle un campo electromagnético o una corriente alterna; en este caso se toman los dos ejes principales 22 y 33.

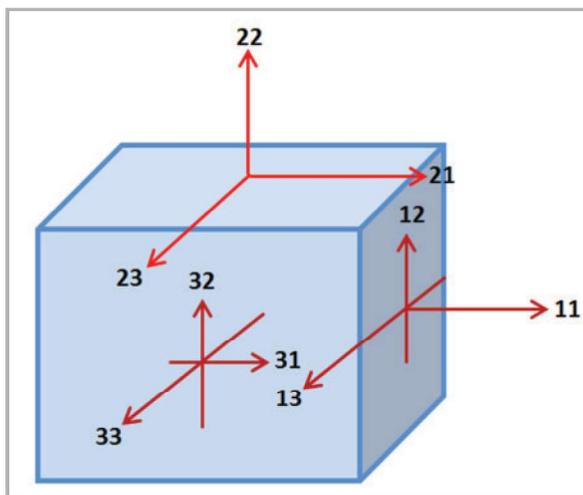


Figura 9. Sistema de tensores 3D para los coeficientes de deformación piezoeléctrica.

Para el caso del SiO_2 los valores de deformación piezoeléctrica son:

- $d_{22} = 2.25 \times 10^{-11} \left[\frac{C}{N}\right]$
- $d_{33} = 0.85 \times 10^{-12} \left[\frac{C}{N}\right]$

donde:

d_{22} es la constante de deformación en el eje 22

d_{33} es la constante de deformación en el eje 33

Para explicar el fenómeno piezoeléctrico, se considera un modelo de las partículas del interior del material antes y después de la deformación, el cual podría explicar cómo una deformación genera un campo eléctrico, y cómo un campo eléctrico genera una deformación.

Deformación mediante la polarización del material piezoeléctrico:

Antes de la polarización, en el interior del material se tiene un campo neutro por el orden natural de las moléculas, **Figura 10. a**. Después de polarizar, existe un reordenamiento de las cargas que se alinean conforme el campo externo, que reaccionan creando un campo interno entre ellas, **Figura 10. b**.

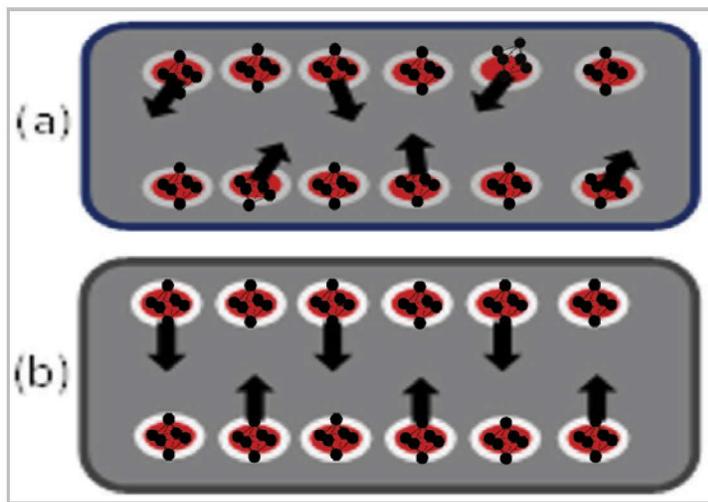


Figura 10. Material piezoeléctrico, antes (a) y después (b) de la polarización.

Se genera una fuerza de repulsión y/o atracción entre las moléculas del material piezoeléctrico, la cual puede estimarse por medio de la ley de Coulomb. Por tanto, las fuerzas generadas por la polarización del SiO_2 , producen movimientos moleculares dentro de la muestra, provocando así la deformación que interactúa con los esfuerzos in-situ en el medio poroso y como resultado se inducen fracturas.

En el modelo físico–matemático que se presenta, se propone una relación de esfuerzos geomecánicos en el medio poroso y las variaciones resultantes del efecto resonante para materiales piezoeléctricos, es decir, una relación entre los

esfuerzos in-situ y esfuerzos generados por la resonancia de materiales piezoeléctricos en el medio poroso.

Relación del efecto piezoeléctrico con la longitud de onda

En la longitud específica que depende del espesor del cristal, se convertirán estos campos en energía mecánica. En la **Figura 11**, en el punto máximo (respecto al espesor del cristal) se calcula la frecuencia natural del cristal con la frecuencia de la onda electromagnética.

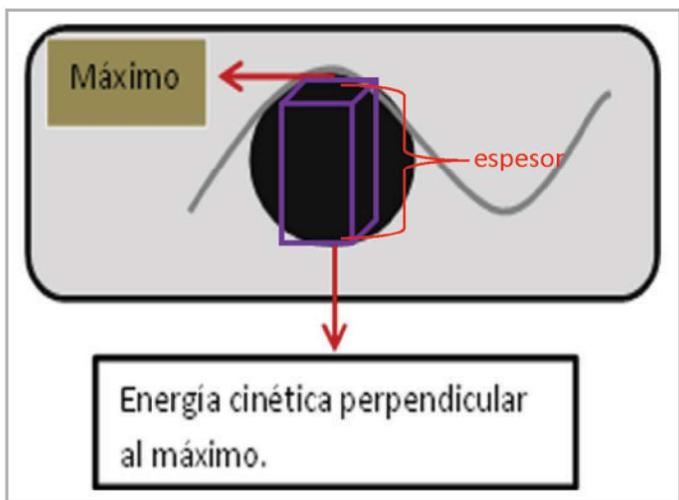


Figura 11. Diagrama del comportamiento de una onda respecto a una partícula del material piezoeléctrico.

Física de rocas

Para la aplicación del fracturamiento electromagnético es imprescindible la caracterización de la arcilla. Por lo tanto, se analizarán los diferentes tipos de arcilla que se encuentran en el subsuelo, con el objetivo de establecer cuáles minerales con su ordenamiento cristalino favorecen este tipo de fracturamiento.

Arcillas

Definición petrológica. Roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico.

Definición sedimentológica. Término granulométrico que aplica a granos por debajo de los 2 [µm].

Las arcillas poseen contenido mineralógico en forma de cristales compuestos por cadenas de favorable para su resonancia a través del medio poroso, es decir, se usan las propiedades piezoeléctricas que presenta el SiO₂, para que por medio de su resonancia se generen esfuerzos que crean fracturas por la inducción de las ondas electromagnéticas a través del medio poroso.

En la **Figura 12** se observa una arcilla litificada y clasificada como grawuaca lítica, para ilustrar el tamaño de los granos en la matriz, con un aumento de 10x.



Figura 12. Grawuaca lítica a 10x.

Propiedades de las arcillas

- Tamaño pequeño < 2 [µm].
- Sustituciones isomorfas que presentan cargas en sus láminas.
- Capacidad de absorción de agua.
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Hidratación e hinchamiento.
- Plasticidad.

Clasificación

De acuerdo a su composición química, **Figura 13**.

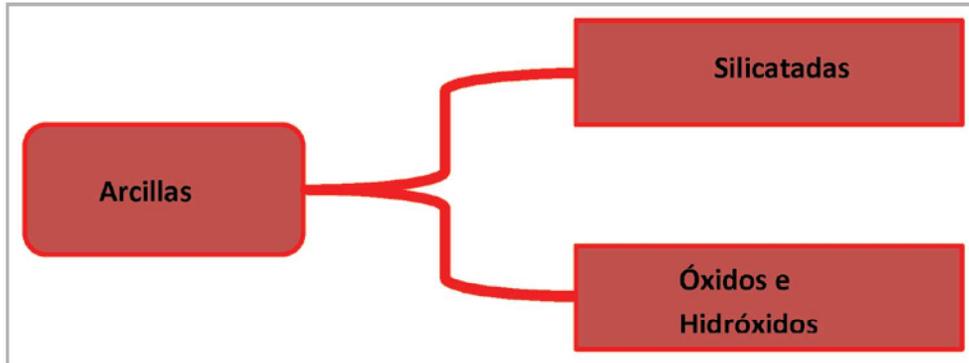


Figura 13. Clasificación general de las arcillas de acuerdo a la composición química. El fracturamiento electromagnético aplica a arcillas silicatadas.

Minerales

- Calcita: Carbonato de calcio [CaCO₃]. Forma. “Diente de perro”, o cristales aplanados, con excelente foliación.
- Dolomita: Carbonato de calcio y magnesio [CaMg(CO₃)₂]. Forma. Los cristales de caras rombales muestran buena foliación.
- Cuarzo: Dióxido de Silicio [SiO₂]. Forma. cristales prismáticos de seis caras.
- Feldespato-K: Silicato de aluminio y de potasio [KAlSi₃O₈]. Forma. Cristales en forma de caja, macizo, con foliación excelente.
- Feldespato Plagioclasa: Silicato de aluminio, sodio y calcio [NaAlSi₃O₈ o CaAl₂Si₂O₈]. Cristales bien formados en masas granulares o con foliación.

La clasificación de los minerales asociados a las arcillas con respecto a su estructura molecular, además de considerar un espesor fijo o variable **Tabla 1**, se advierte que los minerales propicios para la resonancia por inducción de ondas electromagnéticas son las caolinitas, serpentitas, moscovitas, además de, la presencia de cuarzo y feldespato.

Laminares o filosilicatos				
Estructura 1:1	Dioctaédrica	Sin sustituciones	Espesor fijo	Caolinita Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Trioctaédrica	Sin sustituciones	Espesor fijo	Serpentina Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Estructura 2:1	Dioctaédrica	Sin sustituciones	Espesor fijo	Pirofilita Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Dioctaédrica	Con sustituciones en la capa tetraédrica	Espesor fijo	Moscovita KA ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
	Dioctaédrica	Con sustituciones en la capa octaédrica	Espesor variable	Montmorillonita Na _{0.4} (Al _{1.6} Mg _{0.4})Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Trioctaédrica	Sin sustituciones	Espesor fijo	Talco Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Trioctaédrica	Con sustituciones en la capa tetraédrica	Espesor fijo	Flogopita KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
	Trioctaédrica	Con sustituciones en la capa octaédrica	Espesor variable	Hectorita Na _{0.4} (Mg _{2.6} Li _{0.4})Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
	Dioctaédrica y Trioctaédrica	Con sustituciones en la capa tetraédrica y octaédrica	Espesor variable	Vermiculita Formula variable.
Fibrosas				
Estructura 2:1	Con giro de los tetraedros y octaedros cada seis		Espesor variable	Sepiolita
	Con giro de los tetraedros y octaedros cada cuatro		Espesor fijo	Paligorsquita

Tabla 1. Clasificación general de las arcillas. (Largo y Villamarin, 2013).

Estructura molecular de los minerales

La estructura cristalina de las arcillas está formada principalmente por dos grupos: de sílice tetraédricos y de alúmina octaédricos. Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando capas de tetraedros y octaedros. Si un mineral de arcilla presenta un empaquetamiento de una capa tetraédrica y una octaédrica,

se denomina de tipo 1:1 o bilaminares; de una octaédrica entre dos tetraédricas, de tipo 2:1 o trilaminares; y si son dos de cada uno, tipo 2:2. (Largo y Villamarín, 2013).

Dos estructuras básicas describen el ordenamiento molecular de la mayoría de los minerales arcillosos, una con oxígenos empaquetando a átomos de aluminio, magnesio, hierro, y otra con hidróxidos, Figuras 14 y 15.

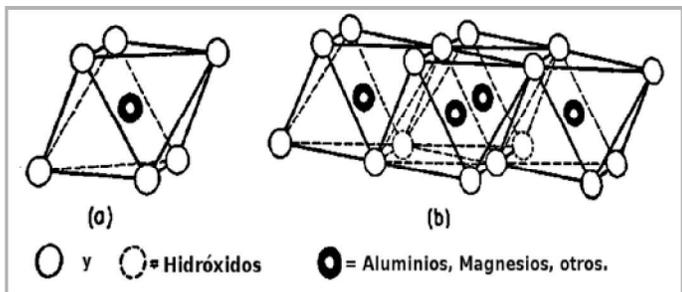


Figura 14. Representación tetraédrica de las moléculas de sílice (a), y (b) arreglo hexagonal de las mismas. (Grim, 1968).

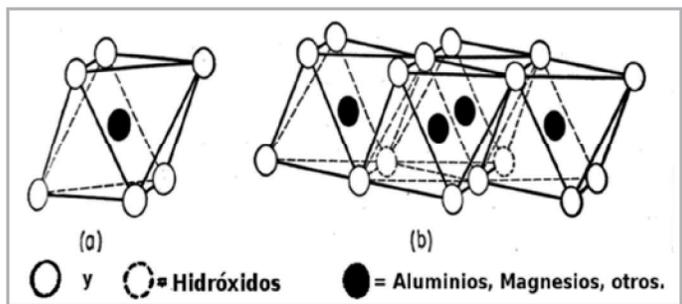


Figura 15. Representación octaédrica de las moléculas de sílice (a), y (b) arreglo octaédrico, (Grim, 1968).

La distancia normal de O-a-O es de 2.6 [Å] y de OH-a-OH 2.94 [Å]. Dicha distancia es importante para el arreglo de los cristales y su forma, que es prioridad en el cálculo de la frecuencia natural que se igualará a la frecuencia de las ondas electromagnéticas.

Caolinitas, Figura 16. Se forman por superposición indefinida de láminas aluminicas y silícicas. La unión entre partículas es muy fuerte, de tal modo que no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas. Presentan poca actividad superficial y sus propiedades coloidales no son favorables para su uso como fluidos de perforación.

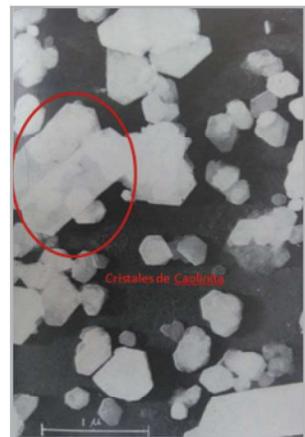


Figura 16. Micrografía electrónica de una caolinita, donde se aprecian los cristales del mineral, (Grim, 1968).

Sistema arcilla-agua

El análisis de los sistemas de contenido de agua en las arcillas (O) se divide en temperaturas bajas hasta temperaturas que van de 100 – 150 [°C], donde se pierde el contenido de agua en ellas. Mientras que en las arcillas (OH) la pérdida de agua surge alrededor de los 300 [°C], conocer el sistema arcilla – agua es de suma importancia para la propagación de las ondas electromagnéticas en el medio poroso, ya que al tener presencia de agua dulce se atenúan las ondas teniendo pérdida de energía de tránsito pero ganando energía térmica por evaporación del agua.

El contenido de agua depende de diversos factores:

- Temperatura
- Espacio basal
- Configuración electrónica de las moléculas
- Contenido mineralógico de las arcillas

Como ya se discutió, los minerales asociados a las lutitas cristalizan en la matriz. Algunos por su estructura química tienen la capacidad de retener agua entre sus espacios intermoleculares. Estos cristales tienden a presentar estructuras bien definidas, las cuales usamos para inducir campos electromagnéticos y así causar resonancia.

Caso de aplicación: muestra grauwuaca lítica

Se seleccionó una muestra de grauwuaca lítica (M5) porque existe una caracterización rigurosa, se aplicarán los parámetros necesarios como el tipo de cristal para el modelo físico-matemático:

- Contenido de cuarzo: 6.78827 [%].
- Contenido de matriz: 58.4498 [%].
- Contenido de materia orgánica: 30.085 [%].
- Contenido de minerales opacos: 4.6772 [%].
- Tamaño de grano medio de todos los componentes de la grauwuaca lítica: N° 9 [ASTM E-112 96].
- Tamaño de grano medio de todos los minerales en la grauwuaca lítica: N° 11 [ASTM E-112 96].

La **Figura 17** muestra la clasificación de areniscas de Dott usada para clasificar la muestra M5, que se usó como prueba en la investigación, la cual se clasifica como grauwuaca lítica.

En la **Figura 18** se aprecia la homogeneidad de la matriz, fluctuando muy poco el tamaño del grano. Lo que facilitó los cálculos asociados al promediar el tamaño del grano.

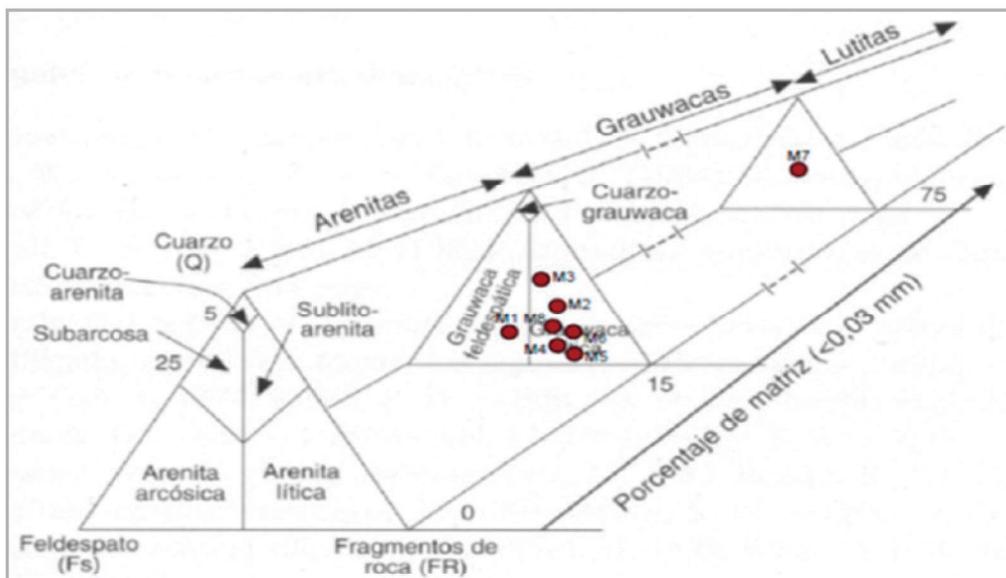


Figura 17. Clasificación de areniscas (Dott, 1964) modificada la muestra M5 es la analizada, (Santillán Piña, 2009).

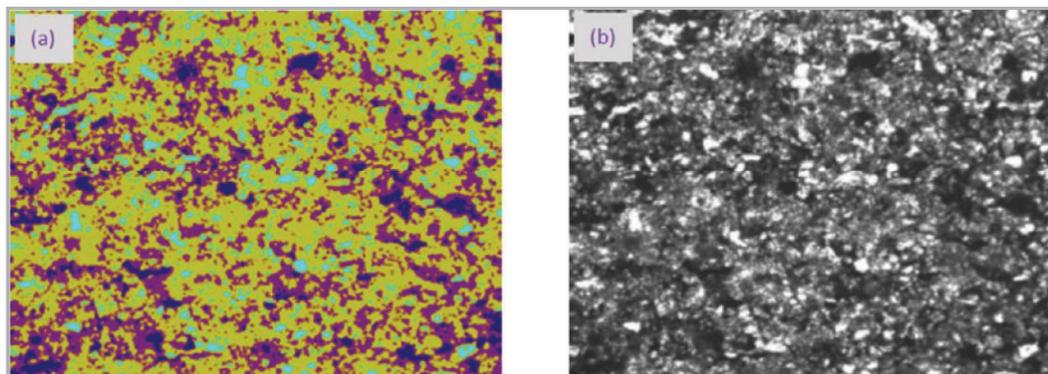


Figura 18. Imágenes con microscopio a) Imagen detectada (10 X), b) Imagen en escala de grises (10 X) (Santillán Piña, 2009).

Según la clasificación ASTM E-112 96 y considerando por conveniencia N° 12, el área promedio del grano es de $0.000032 [mm^2]$. Además, considerando una geometría esférica idealiza se tiene lo siguiente:

- Diámetro del grano: $5.6 \times 10^{-6} [m]$
- Volumen promedio del cristal de SiO_2 : $9.195232258 \times 10^{-17} [m^3]$
- Volumen de la molécula de considerando un octaedro regular: $8.285405857 \times 10^{-30} [m^3]$
- Espesor aproximado por cada cristal de SiO_2 : $5.6 \times 10^{-6} [m]$

Se sabe que el material más abundante de la corteza terrestre es el sílice; los minerales asociados a las lutitas, son cadenas de sílice-oxígeno con otros elementos.

El SiO_2 es un material dieléctrico, por tanto, crea un campo interno de acuerdo al orden de sus moléculas, al hacer pasar un campo eléctrico sobre su medio. Este campo dependerá del orden de sus moléculas, el cual determinará si se anulan o si se magnetizan.

El dióxido de silicio se considera un material piezoeléctrico, además de ser un semiconductor usado ampliamente en la electrónica.

Lo anterior permite visualizar una reacción a nivel molecular de la grauwaca lítica, al aplicársele campos electromagnéticos variables.

De lo discutido anteriormente se considera la unidad molecular de los cristales de SiO_2 en las arcillas definida en física de rocas, Figuras 14 y 20.

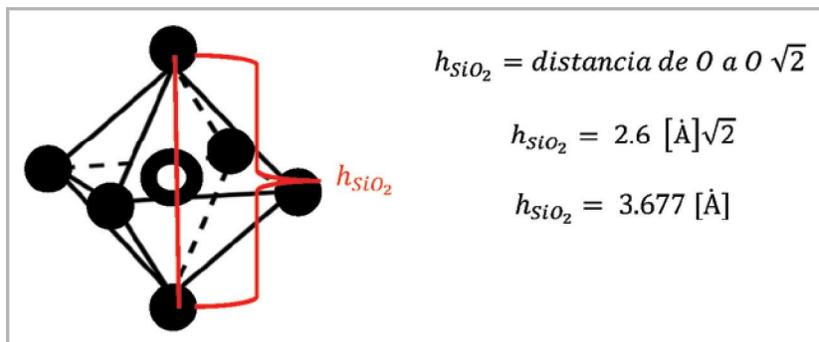


Figura 20. Cálculo del espesor primario de los cristales con base en la unidad molecular.

Del diámetro sugerido del grano se ajusta $h_{SiO_2} = 0.00056 [cm]$, valor que se considera es el espesor de los granos en la matriz.

Modelación físico-matemática

Una vez conocido el tipo de arcilla y roca que se estudiará se procederá a desarrollar el modelo físico-matemático para el cristal de interés, encontrar la relación entre las variables y las características geológicas que posibiliten la cuantificación y desarrollo analítico de la modelación.

Un campo eléctrico que se propaga por el medio es directamente proporcional a la fuerza eléctrica e inversamente proporcional a la carga eléctrica, (Ec. 17):

$$E = F_e/q \quad (17)$$

Los modelos presentados refieren al cristal, es decir considerando que la OEM ya está incidiendo sobre la superficie del cristal.

Ley de Gauss:

$$\oint_{Surf} D(ej_{e_{33,22}}) \cdot ds = Q \quad (18)$$

Si la carga está en movimiento:

$$i(t) = \oint_{Surf} J \cdot ds \quad (19)$$

Momento dipolar:

$$p = Q \cdot r \quad (20)$$

Polarización del material:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta Vol} \sum \vec{q}_i \quad (21)$$

Se sabe que al polarizar se tienen cargas libres y cargas dentro del material polarizado, por tanto.

Cargas en la superficie:

$$Q_{sup} = - \oint_{Sup} \vec{P} \cdot \vec{ds} \quad (22)$$

Carga total:

$$Q_{sup} + Q = Q_T \quad (23)$$

Aplicando Ley de Gauss:

$$Q_T = \oint_{Sup} \epsilon_0 \vec{E} \cdot \vec{ds} \quad (24)$$

Ahora de la permitividad de un medio:

$$\vec{P} = (\epsilon_r - 1) \cdot \epsilon_0 \vec{E} \tag{25}$$

Donde la carga por unidad de área:

$$Q_A = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \vec{E} \tag{26}$$

El análisis se debe realizar en las tres dimensiones para aprovechar los datos geomecánicos de la formación; sin embargo, en el presente trabajo se toman en cuenta los ejes principales 33 y 22, Figura 9.

Se hace coincidir los ejes principales del estado triaxial de esfuerzos con los ejes 33 y 22, **Figura 21**.

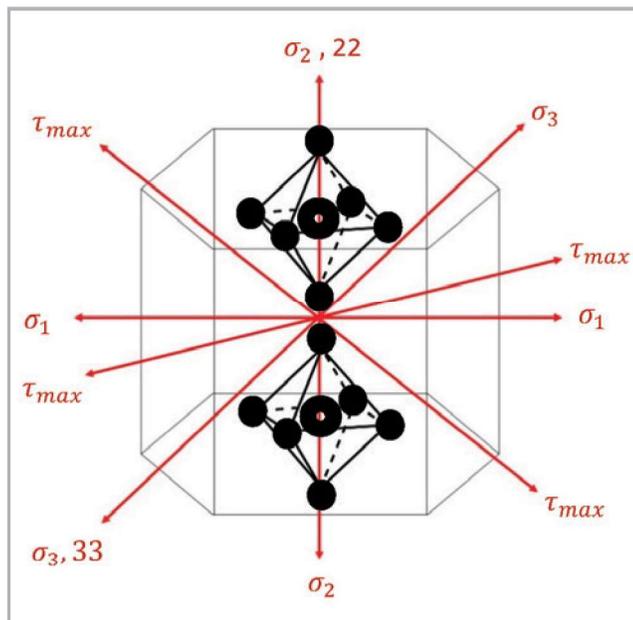


Figura 21. Cristal del piezoeléctrico alineado al estado triaxial de esfuerzos del medio poroso para el eje 22 y se hace lo mismo para 33; se iguala a cualquiera de los ejes el eje z de propagación de las OEM.

Relación entre los esfuerzos y el campo eléctrico (Özgen, 2015):

$$D = d \cdot T \tag{27}$$

$$T = \epsilon_k E/d \tag{28}$$

$$\sigma_{ik} = \epsilon_{k_{ik}} E/d \tag{29}$$

Considerando los cristales isotrópicos y homogéneos, los valores para los coeficientes de deformación piezoeléctrica *del SiO₂* son los siguientes:

- $d_{22} = 2.25 \times 10^{-11} \left[\frac{C}{N} \right]$
- $d_{33} = 0.85 \times 10^{-12} \left[\frac{C}{N} \right]$

En la ec. 29, sustituimos el valor de d_{22} y d_{33} :

$$\sigma_{33} = 1.17647 \times 10^{12} [\epsilon_k E] \quad (30)$$

$$\sigma_{22} = 4.444 \times 10^{10} [\epsilon_k E] \quad (31)$$

Cálculo de la permitividad del *SiO₂*:

$$\epsilon_{ik} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_{ik} = (4.5)(8.85 \times 10^{-12}) = 3.9825 \times 10^{-11} \left[\frac{C^2}{Nm^2} \right]$$

Sistema Internacional de unidades [Pa]:

$$\sigma_{33} = 46.85294 \cdot E \quad (32)$$

$$\sigma_{22} = 1.77 \cdot E \quad (33)$$

Unidades de campo [psi]:

$$\sigma_{33} = 6.795442 \times 10^{-3} \cdot E \quad (34)$$

$$\sigma_{22} = 2.567167 \times 10^{-4} \cdot E \quad (35)$$

$$E_{33} = \sigma_{33} / 6.795442 \times 10^{-3} \quad (36)$$

$$E_{22} = \sigma_{22} / 2.567167 \times 10^{-4} \quad (37)$$

Estas ecuaciones permiten calcular el campo eléctrico requerido para que exista movimiento en los minerales contenidos en la roca (*SiO₂*), descrito con respecto a los ejes 22 y 33.

Es necesario conocer la magnitud del campo eléctrico requerido respecto a las presiones típicas de los yacimientos **Figura 22**, como se idealizaron los cristales se tiene un comportamiento lineal.

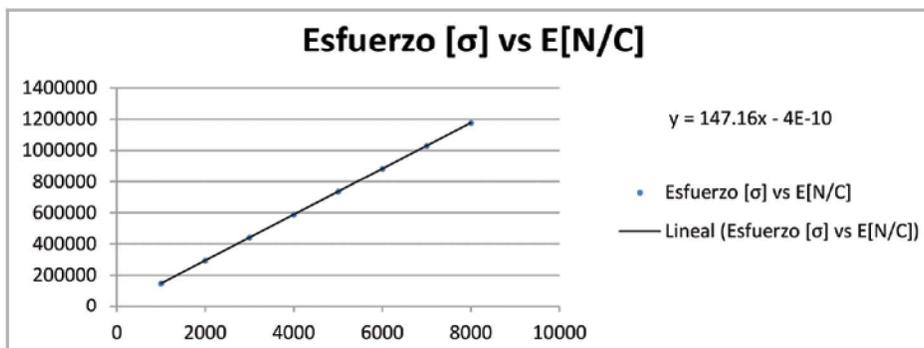


Figura 22. Aumento del campo eléctrico E respecto a las presiones σ típicas encontradas en un yacimiento.

Cálculo de la frecuencia natural de los cristales:

$$h_{SiO_2} = 0.00056 \text{ [cm]}$$

El cálculo de la frecuencia natural de un cristal homogéneo e isotrópico para un corte AT, que es de uso preferencial en electrónica debido al arreglo molecular en el cristal es:

$$f_n = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{\mu_q}{\rho_q}} \tag{38}$$

Se varía el valor de d y se grafica la frecuencia natural con respecto al espesor para observar su comportamiento **Figura 23** REGIÓN I el espesor de los cristales es menor

a 1×10^{-3} [cm], donde el comportamiento se puede considerar lineal, REGIÓN II el espesor de los cristales es mayor, por lo tanto, el modelo lineal no se aplica.

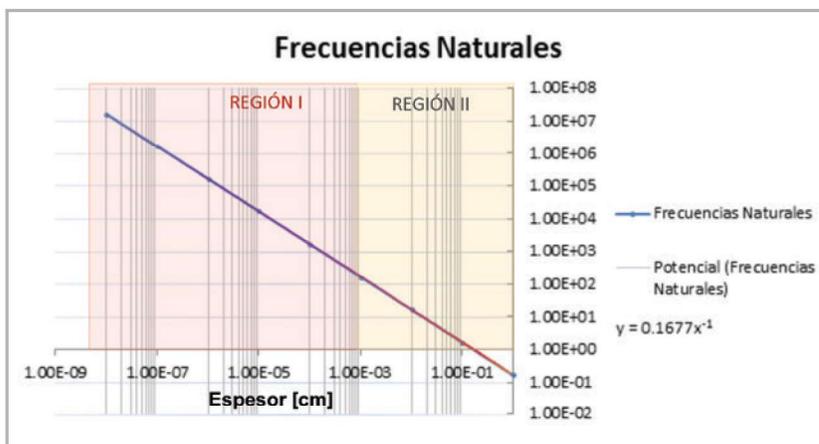


Figura 23. Frecuencia natural respecto al espesor d [cm], Región I. Región donde se pueden considerar los cristales isotrópicos y homogéneos. Región II. Región donde el modelo debe modificarse para considerar anisotropía del cristal.

Si el espesor del cristal disminuye, la frecuencia natural aumenta.

Ejemplos:

Un cristal con $d = 1$ [cm], tiene una frecuencia natural de 0.1677 [MHz]

Un cristal con $d = 1$ [mm], tiene una frecuencia natural de 1.677 [MHz]

Por nuestras estimaciones igualamos $h_{SiO_2} = d$ y calculamos la frecuencia natural de los cristales en la muestra:

$$f_n = 299.448 \text{ [MHz]} \tag{39}$$

Se debe desarrollar para aplicación del método en yacimientos con altas presiones un sustituto para la ecuación de Sauerbrey, ya que se diseñó para tomar en cuenta la modificación de resonancia en un circuito por efectos de cambios de masa en el cristal. Sin embargo, dicha ecuación tiene limitaciones de uso, por lo que no es viable considerarla.

También se tiene el cambio de frecuencia por presencia de fluidos (Kanazawa, 1985):

$$\Delta f = -f_0^2 \left(\frac{\eta_l \rho_l}{\pi \rho_q \mu_q} \right)^{1/2} \tag{40}$$

Donde se considera un fluido newtoniano, ecuación que debe emplearse para considerar el efecto causado por la presencia de los fluidos que saturan al medio poroso; sin embargo, en la muestra no se tiene contenido de fluidos.

Resultados

Se resolvió el método con los parámetros descritos anteriormente para provocar la resonancia de los minerales contenidos en la muestra, obteniéndose magnitud del campo eléctrico y frecuencia de la onda electromagnética.

Se trabajó con el tamaño medio del grano en la matriz derivado de los estudios de laboratorio (Santillán Piña, 2009) para simplificar los cálculos, **Figura 24**.

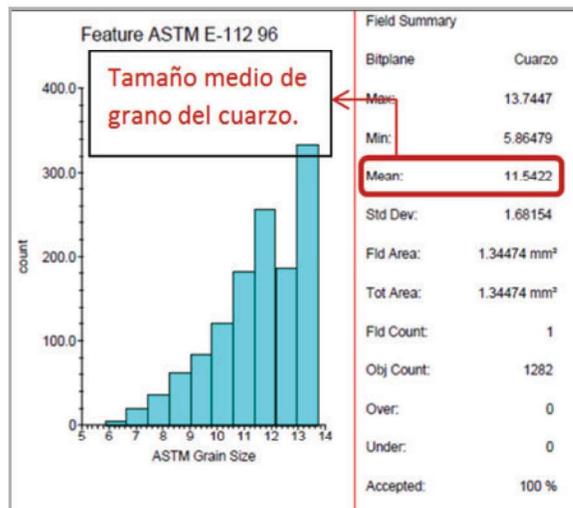


Figura 24. Resultados en el análisis mineralógico de la muestra M5, referente al contenido de cuarzo, (Santillán Piña, 2009).

Se experimentó con la muestra de grawuaca lítica aplicando microondas y por efectos del SiO_2 , dentro de la muestra se generó resonancia y calentamiento (80 [°C] máx).

Se usó una guía de ondas de un modo con forma cilíndrica hueca, **Figura 25**, de un magnetrón de 900 [MHz] y 1000 [KW]

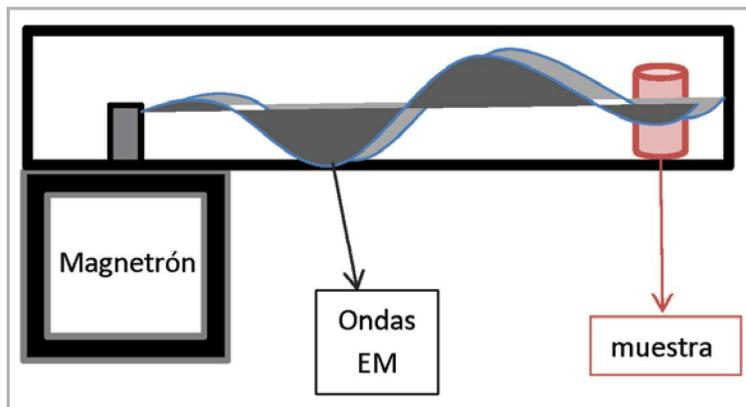


Figura 25. Arreglo del dispositivo de irradiación con una guía de ondas cilíndrica hueca la cual funge como transmisor de las ondas electromagnéticas desde la antena hasta la muestra.

Se extrajo el magnetrón de un microondas casero como se mencionó anteriormente, y se fabricó una guía de ondas cilíndrica hueca para propagar las ondas electromagnéticas desde la antena hasta la muestra, se ilustra el dispositivo en la **Figura 26**.



Figura 26. Magnetrón 900 [MHz] con modificación en la guía de ondas.

Se comprobó la propagación de las ondas electromagnéticas, a través de la guía al encender el dispositivo diseñado para este propósito en la antena, **Figura 27**, es decir, que las ondas se propagan y algunas regresan a la antena.



Figura 27. Indicador encendido de la antena en el magnetrón, indicando así la propagación de ondas a través de la guía.

Se usó un porta muestras de plástico con el tamaño justo al diámetro de la guía de ondas, donde se colocó la muestra de grawuaca lítica para ser irradiada, en la **Figura 28** se observa la muestra íntegra antes de ser irradiada.



Figura 28. Muestra M5 antes de ser irradiada por las microondas.

Se colocó el porta muestras en la cavidad de la guía de ondas para su irradiación, **Figura 29**.



Figura 29. Colocación de la muestra M5 para ser irradiada.

Se inició la irradiación de la muestra por un lapso de tiempo de 120 [s], ya que aseguramos así que las fracturas son producto de la resonancia de los minerales contenidos, y no por fracturas por calentamiento diferencial, **Figura 30**.



Figura 30. Irradiación de la muestra.

Finalmente, la estructura de la roca quedó comprometida y sometiéndola a un esfuerzo menor al de control, cedió y se fragmentó, **Figura 31**.



Figura 31. Muestra M5 fracturada con una cantidad menor de energía por efecto de la irradiación.

Debido a la magnitud de frecuencia, las ondas electromagnéticas hicieron resonar a los cristales con un espesor de 0.0001863233 [cm], que representa una traza de la fracción del 6.78 [%] de contenido en la roca. Por tanto, se aplicó un esfuerzo de control a la muestra, después de ser irradiada cedió con un esfuerzo menor y se fracturó.

La energía necesaria para fracturar la muestra sin irradiar fue de 1.05 [J], mientras que al irradiarla se requirió de 1 [J], esto implica un 5[%] de ahorro en una muestra que apenas contenía una fracción pequeña (menos del 6 [%]) de material resonante.

De haber contado con una frecuencia modulada se habrían mejorado los resultados, pero se pretendía probar que era posible y se demostró. La frecuencia modulada se refiere a poder modificar la magnitud de la frecuencia de las ondas electromagnéticas para cubrir un mayor rango en el tamaño de los cristales contenidos en la muestra.

Estas microondas penetran la roca e interactúan con los minerales que contiene, haciéndolos resonar, convirtiendo la energía electromagnética en energía cinética y térmica, lo cual crea un desprendimiento violento del mineral

incrustado en la matriz de la roca, dando como resultado micro fracturas que modificarán su continuidad.

Conclusiones

Las fracturas se lograron inducir por medio de campos electromagnéticos en una muestra del campo Chicontepec, debido a la deformación piezoeléctrica que presentan los cristales de cuarzo contenidos en la muestra.

Por medio de la resonancia de los minerales dieléctricos presentes en la formación, se logra crear fracturas en todo el medio poroso, encontrando así una forma de fracturamiento con base en la resonancia, el cual complementa el método por calentamiento.

El método está limitado a la presencia de minerales piezoeléctricos como el SiO_2 además por la temperatura de Curie, ya que, al llegar a ella, se pierde la capacidad de polarización en los minerales, que es la base para la resonancia dentro del medio poroso, y es aquí donde inicia la ruptura por calentamiento.

También, favorece a la generación de fracturas la presencia de agua, ya que se calienta, evapora y expande, aportando energía al nuevo sistema de equilibrio de fuerzas en el medio poroso.

Ventajas

- Al ser más consolidados los minerales que la propia matriz, la micro fractura es inminente venciendo sin problemas los esfuerzos de sobrecarga de la formación.
- Al modular la frecuencia de irradiación y combinarlo con micro sísmica (generar ondas sísmicas desde el pozo a la misma frecuencia que las ondas electromagnéticas) se espera el máximo aprovechamiento para la inducción de fracturas.
- EL contenido de agua favorece al reordenamiento del estado de equilibrio en los esfuerzos in situ por calentamiento y vapor a alta presión.

Desventajas

- Diseño y fabricación de equipos de inducción especializados.
- Disponibilidad de energía eléctrica.
- Aplicado a pozos en agujero descubierta.
- La temperatura del yacimiento debe estar por debajo de la temperatura de Curie del material a resonar (se tiene que determinar).

Recomendaciones

El uso de frecuencias moduladas es la mejor vía para generar fracturas inducidas por fracturamiento electromagnético. Mientras menor sea el tamaño de los cristales aumenta la frecuencia requerida, por lo tanto, se debe irradiar empezando con frecuencias bajas para ir aumentando gradualmente, en función del tamaño de los cristales.

Nomenclatura

\vec{D}	<i>Campo de Desplazamiento Eléctrico [C/m²]</i>
E_{max}	<i>Campo Eléctrico Máximo Requerido [N/C]</i>
F_e	<i>Fuerza Eléctrica [N]</i>
\vec{J}	<i>Densidad de Corriente [C/m²]</i>
\vec{P}	<i>Polarización [C/m²]</i>
P_D	<i>Factor de Penetración [Adimensional]</i>
Q_{sup}	<i>Carga Eléctrica Superficie [C]</i>
Q_T	<i>Carga Eléctrica Total [C]</i>
f_n	<i>Frecuencia Natural de Resonancia [Hz]</i>
ϵ'	<i>Permitividad Relativa Respecto al Medio [Adimensional]</i>
ϵ_0	<i>Permitividad del Vacío [C²/N·m²]</i>
ϵ_{eff}	<i>Permitividad Efectiva del Medio</i>
ϵ_r	<i>Permitividad Relativa del Material [Adimensional]</i>
η_l	<i>Viscosidad del Fluido [cP]</i>
μ_0	<i>Permeabilidad Magnética [N/A²]</i>
μ_q	<i>Módulo de Corte del Cuarzo [gr/cm·s²]</i>
ρ_l	<i>Densidad del Fluido [gr/cm³]</i>
ρ_q	<i>Densidad del Cuarzo [gr/cm³]</i>
σ_1	<i>Esfuerzo Máximo Horizontal [Pa,psi]</i>
σ_2	<i>Esfuerzo Vertical [Pa,psi]</i>
σ_3	<i>Esfuerzo Mínimo Horizontal [Pa,psi]</i>
τ_{max}	<i>Esfuerzo de Tensión Máximo [Pa,psi]</i>
Δm	<i>Cambio de Masa [gr]</i>
A	<i>Área de Contacto del Cristal [cm²]</i>
B	<i>Campo Magnético [T]</i>
E	<i>Campo Eléctrico [N/C]</i>
H	<i>Intensidad del Campo Magnético [A/m]</i>
K_e	<i>Permitividad Relativa</i>
P	<i>Polarización [C/m²]</i>
Q	<i>Carga Eléctrica Libre [C]</i>
T	<i>Esfuerzo Tensión en el Cristal [Pa,psi]</i>
Z	<i>Tensión Mecánica [N/m²]</i>
d	<i>Coefficiente de deformación piezoeléctrica [m/V]</i>

e	Deformación Elástica
f	Frecuencia [Hz]
g	Coefficiente de Tensión Piezoeléctrica [m^2/C]
$i(t)$	Corriente Eléctrica [A]
q	Carga Eléctrica [C]
s	Coefficiente de Elasticidad [m^2/N]
t	Tiempo [s]
v	Velocidad de Propagación [m/s]
κ	Factor de Amortiguamiento
λ	Longitud de onda [m]
ρ	Densidad [gr/cm^3]
τ	Esfuerzo de Tensión [Pa,psi]
χ	Susceptibilidad eléctrica
ϱ	Momento Dipolar [C·m]

Referencias

- ASTM E112-96, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 2004. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- Belousov, VV. 1979, *Geología Estructural*, segunda edición. Moscú: Mir.
- Beltrán Martínez, R. 2009. *Diseño Geotécnico y Estructural de una Cimentación en Arcilla Expansiva*. Tesis de Maestría, UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Ingeniería Civil, Geotecnia, Ciudad Universitaria, México, D.F.
- Castillo Migone. J. 2008. Tecnología de las Microondas en los Procesos de Conminución de Minerales. *Invest. Apl. Innov.* **2** (1): 11-16.
- Garaicochea P. F. 1985. *Apuntes de Estimulación de Pozos*, [México, D.F.]: UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Ciencias de la Tierra.
- Gökhan O. Özgen 2015, *ME 493 Introduction to Smart Structures and Materials*, FALL, METU, Ankara.
- Grim, R. E. 1968. *Clay Mineralogy*, second edition. New York: McGraw-Hill.
- IEEE Standard on Piezoelectricity. 1987. New York, New York: IEEE.
- Kanazawa, K. K. y Gordon, J. G. 1985. Frequency of a Quartz Microbalance in Contact with Liquid. *Anal. Chem.* **57** (8): 1770-1771. <https://doi.org/10.1021/ac00285a062>.
- Largo Castro, D. P. y Villamarín, Coral, K. M. 2013. *Caracterización y Activación Química de Arcilla Tipo Bentonita para su Evaluación en la Efectividad de Remoción de Fenoles Presentes en Aguas Residuales*. Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Escuela de Química, Química Industrial, Pereira, Risaralda, Colombia.
- Lee, P. C. Y. 1989. Electromagnetic Radiation from an AT-Cut Quartz Plate Under Lateral-Field Excitation. *Journal of Applied Physics* **65** (4): 1395-1399. <https://doi.org/10.1063/1.343004>.
- Liu, F. 2014. *Exploration of Microwave-Assisted Breakage of Rocks: The effect of Size, Shape, and International Discontinuity of Rock on Microwave Distribution*. MS thesis, McGill University, Department of Mining & Materials Engineering, Montreal, Quebec, Canada.
- Murphy Arteaga, R. 2001. *Teoría Electromagnética*, México: Editorial Trillas.
- Niemeyer Rubilar H. *Apuntes de Geología Estructural. Primera Parte: Fracturas Frágiles*, Antofagasta, Chile: H. Niemeyer Rubilar.
- Ruisánchez Rodríguez, E. 2013 *Molienda Asistida con Microondas de Materiales Siderúrgicos*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Programa de Doctorado de Tecnología, Diversificación, Calidad y Ahorro Energético.
- Santillán Piña N. 2009. *Paleoambientales Sedimentos en Facies Turbidíticas en la Cuenca Terciaria de Chicontepec, Centro Oriente de México*. Tesis de Maestría, UNAM, Posgrado de Ciencias de la Tierra.
- A.V. Varzin, A. 1959, *process for working rock*, Gorngi Zhi.
- Weaver C.E. 1989. *Clay, Muds, and Shales*. Amsterdam: Elsevier. Vol. 44, USA, November 1989.

Agradecimiento

Al profesor Noé Santillán Piña, por su colaboración en este trabajo al proporcionarnos la muestra, así como su caracterización mineralógica.

Semblanza de los autores

Mario Ubaldo Rangel Gutiérrez

Estudiante de último semestre de Ingeniería Petrolera en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; imparte docencia a nivel medio superior en física y matemáticas.

Nelson Barros Galvis

Ingeniero Químico e Ingeniero de Petróleos egresado de la Universidad Industrial de Santander. Se doctoró en el Instituto Mexicano del Petróleo, su enfoque y especialidad es en ingeniería de yacimientos y perforación, geomecánica, fluido dinámica, y operaciones de transferencia de masa y calor. Cuenta con más de 10 años de experiencia en la industria y en la academia. Fue profesor de la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM) y la Universidad Autónoma de Nuevo León, (UANL) en México. También laboró en el Instituto Colombiano del Petróleo ICP - ECOPETROL, en los campos de British Petroleum como contratista, desarrollando actividades en fracturamiento hidráulico, geomecánica y perforación de pozos.

Cuenta con varios artículos, software desarrollados con derechos de autor, un libro y una patente de invención pendiente. Actualmente, es un senior en fluido dinámica y geomecánica petrolera.

Fernando Samaniego Verduzco

Realizó sus estudios en la Especialidad de Ingeniería Petrolera, Licenciatura y Maestría en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, y Doctorado en la Universidad de Stanford, EUA.

Fue Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo; Instituto de Investigaciones Eléctricas, y en Petróleos Mexicanos. Actualmente es profesor Titular "C" en la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.