

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO**



REINYECCION DEL AGUA DE PRODUCCION DE UN YACIMIENTO DE
PETROLEO COMO ALTERNATIVA PARA UN PROCESO DE MANEJO
AMBIENTAL

**TITULACION POR ACTUALIZACION DE CONOCIMIENTOS PARA
OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE PETROLEO**

ELABORADO POR:

EDUARDO FRANCISCO SIHUAY MARAVI

PROMOCION 1999

LIMA – PERU

2004

INDICE

1. SUMARIO

1.1. RESERVORIOS CON MECANISMO DE IMPULSIÓN WATER DRIVE

2. PROBLEMATICA

3. PROPUESTA DE SOLUCION

4. ESTRUCTURACION DE LA PROPUESTA DE SOLUCION

4.1. INTRODUCCION

4.2. PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION

4.2.1. EVALUACION GEOLOGICA

4.2.1.1. *Estudios de Sísmica Regionales*

4.2.1.2. *Estudios de Otros Métodos de Prospección Geofísica en Superficie*

4.2.1.3. *Información de Registros Eléctricos y Litológicos de Pozos Exploratorios y de Pozos en Producción.*

4.2.1.4. *Mapas geológicos*

4.2.1.5. *Mapas Geomorfológicos*

4.2.2. EVALUACION HIDROGEOLOGICA

4.2.2.1. *Estudios Geológicos en el Ámbito Hidrogeológico*

4.2.2.2. *Caracterización Hidrodinámica del Acuífero*

4.2.3. EVALUACION DE RESERVORIOS

4.2.3.1. *Calidad del Agua Producida*

4.2.3.2. *Procesos de Monitoreo y Control*

4.2.3.2.1. *Monitoreo a Presión Continua*

4.2.3.2.2. *Pruebas de Inyectividad y Pruebas Fall-Off*

4.2.3.2.3. *Pozos de observación y/o Vigilancia*

4.2.3.2.4. *Fluidos de Inyección*

4.2.3.2.5. *Aspectos Mecánicos*

4.2.3.3. *Problemas Operacionales*

4.2.3.3.1. *Aumento de presión (Presiones Build-Up)*

4.2.3.3.2. *Problemas de Confinamiento*

4.2.3.3.3. *Complicaciones Mecánicas*

4.2.3.3.4. *Estrategias Alternativas*

4.2.4. EVALUACION AMBIENTAL

4.2.4.1. *Preliminares*

4.2.4.2. *Programa de Control*

4.2.4.2.1. *Acuíferos Candidatos, Invulnerables ó Inafectos*

4.2.4.2.2. *Pozos de Inyección Clase II*

4.2.4.2.3. *Área de Revisión para pozos Clase II*

4.2.4.2.3.1. *Zonas a Influir con Peligro*

4.2.4.2.3.2. *Radio Fijado, de Vulnerabilidad o Establecido*

4.2.4.2.4. *Acciones de Contingencia*

4.2.4.2.5. *Aspectos Normativos Mecánicos (Integridad Mecánica)*

4.2.4.2.6. *Prioridad de Criterios a Considerar para “Cuestionar” los permisos de Inyección*

4.2.4.2.7. *Consideraciones para Procesos de Abandono y Sellado de Pozos de Inyección*

4.2.4.2.8. *Criterios y Estándares Aplicados a Pozos Clase II*

4.2.4.2.8.1. *Requerimientos de Construcción*

4.2.4.2.8.2. *Requerimientos para Procesos de Operaciones, Monitoreo y Reporte*

4.2.4.2.9. *Información solicitada por la Entidad Fiscalizadora*

5. CONCLUSIONES

6. TABLAS

7. APENDICES

7.1. APÉNDICE “A” (Aspectos Teóricos de Geología)

7.2. APÉNDICE “B” (Aspectos Teóricos de Hidrogeología)

7.3. APÉNDICE “C” (Aspectos Teóricos de Reservorios)

8. BIBLIOGRAFIA

1. SUMARIO

La producción de petróleo y gas es usualmente acompañado por una cantidad de agua producida, esta producción de agua proviene del agua que entra a la formación (mecanismo de impulsión Water Drive), o por caudales de agua posteriormente inyectados dentro de la formación, con fines de realizar una Recuperación Secundaria. El agua de producción puede resultar en flujo continuo a caudales considerables, en operaciones de Exploración y Producción. Por ello las cantidades producidas en superficie son altas y requieren de un manejo adecuado para su disposición y destino final.

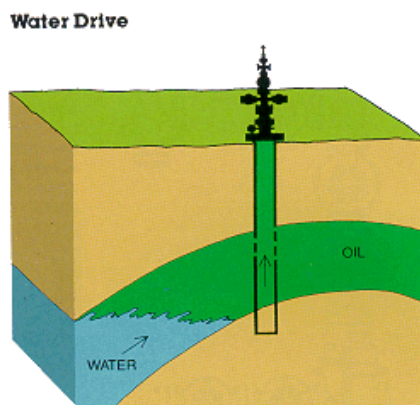
Los reservorios de petróleo que produce cantidades considerables de agua son los denominados reservorios "Water Drive". El porque estos reservorios generan cantidades considerables de agua producida es porque el drenaje del agua realiza un efecto de empuje que es una forma de energía de desplazamiento a los fluidos del reservorio, inundando al reservorio.

1.1 RESERVORIOS CON MECANISMO DE IMPULSION WATER DRIVE

Dentro de la fase de explotación de yacimientos de petróleo, el agua tiene un papel importante como fuente de energía de impulsión en reservorios con mecanismo de impulsión Water Drive. Cuando la etapa de producción comienza, los hidrocarburos fluyen con diferentes densidades y viscosidades, en el reservorio entrampado que posee diferentes porosidades, permeabilidades, presiones y temperaturas. Cada reservorio tiene una determinada presión de entrampamiento asociado a los fluidos que la contienen y cuando el reservorio es puesto en producción se genera un desbalance de presiones al cual se le denomina presión diferencial.

Esta presión diferencial entre la presión de fondo del pozo en producción y otra presión de entrampamiento de los fluidos a un determinado radio de drenaje, hace que los fluidos se muevan dentro del reservorio hacia el pozo

abierto, y seguidamente hacia la superficie. Una de las presiones en mención, es generada por el agua, localizada debajo de la formación petrolífera y es quien empuja a los fluidos menos densos del reservorio. Esto ocurre en los denominados “Reservorios con Mecanismo de Impulsión Water Drive”. En campos petroleros, donde los reservorios se caracterizan por un empuje tipo Water Drive, la formación donde se encuentra el agua, comúnmente se le denomina Acuífero.



2. PROBLEMATICA

El manejo del agua producida en cantidades considerables, requiere de un tratamiento estructurado e integral para su disposición y destino final adecuado; lo cual considerará una amplia gama de opciones y de tecnología.

Un aspecto clave en la disposición del agua producida, es la gerencia estratégica de su destino final y sus efectos en el ambiente de recepción a elegirse. Las alternativas de disposición y manejo del agua producida, generadas en la explotación de hidrocarburos; deben estar acordes a las regulaciones ambientales a las cuales puede estar sujeto la industria petrolera y también a los costos asociados a la alternativa elegida de su disposición.

3. PROPUESTA DE SOLUCION

Un esquema de solución acorde a un manejo ambiental, propone **reinyectar el agua producida tratada**, en un acuífero confinante estratégico dentro de la estratigrafía del yacimiento de hidrocarburos en explotación; con fines de evitar un proceso de contaminación ambiental significativo y disponer de esta forma el agua producida.

Además la posibilidad de riesgo de contaminar aguas nativas superficiales, es tomada en cuenta al momento de evaluar las condiciones geológicas e hidrogeológicas del acuífero confinante para evitar filtraciones posteriores hacia afuera de la formación donde se ubique el acuífero.

4. ESTRUCTURACION DE LA PROPUESTA DE SOLUCION

4.1 INTRODUCCION

Cuando la alternativa de reinyectar el agua producida es elegida, debemos asegurar técnicamente, que el confinamiento del agua producida inyectada dentro del estrato (acuífero) elegido; sea acorde a un programa de manejo ambiental aceptable; es decir que la inyección no genere impacto ambiental posterior a lo largo del acuífero elegido dentro de un tiempo bastante considerable.

El proceso de inyección del agua producida, requiere de una administración más compleja que otras opciones de disponer el agua producida, porque necesita evaluar diferentes aspectos tales como geológicos, hidrogeológicos, composición química del agua de formación, historial del yacimiento en explotación, cantidades producidas de agua de formación y otras más. Por ende se ha de estructurar el proyecto en base a un programa que implique comprender los siguientes aspectos: Procedimientos de evaluación (Geológica, Hidrogeológica, Reservorios (Pruebas de Inyectividad) y Normas Ambientales; al final anexar resúmenes de aspectos teóricos que sirvan de sustento técnico en los procesos de evaluación. Estos últimos serán considerados como Apéndices (Apéndice "A" Aspectos de Geología, Apéndice "B" Aspectos de Hidrogeología y Apéndice "C" Aspectos de Reservorios).

4.2 PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION

4.2.1 EVALUACION GEOLOGICA

La elaboración de un modelo geológico, es caracterizar correctamente el lugar y definir unidades con comportamiento similar. A través de esta información los ingenieros geólogos o geotécnicos pueden desarrollar un modelo geológico conceptual que resulte de gran utilidad para los proyectos desarrollados sobre el mismo terreno.

Inicialmente debemos realizar una descripción general de la cuenca en explotación, es decir un Marco Regional en donde se detallen sus características generales de formación, delimitando las extensiones en la cuenca utilizando referencias geológicas conocidas del lugar.

Luego, conocer las edades geológicas en las cuales se realizaron los procesos sedimentarios y que afluentes hidrográficos de la zona, realizaron estos procesos de sedimentación. El empleo de indicadores de edad relativa permite ordenar cronológicamente los distintos tramos rocosos que aparecen en la corteza terrestre construyendo una *escala ordenada* de eventos y materiales. De esta forma, la historia geológica de la corteza se divide en distintas unidades, que de mayor a menor orden, son: *eras* (definidas principalmente a partir de discordancias, es decir, señalando ciclos orogénico, es decir, períodos en que hubo formación de montañas); *sistemas* (definidos principalmente mediante discordancias y contenido faunístico) y *pisos* (definidos principalmente por contenido faunístico y cambios litológicos significativos).*[Tomar como referencia las tabla 01 (Escala geológica) y tabla 02 (Tabla de Edades).]*

El decaimiento radiactivo es un método usado porque varía con el tiempo constantemente aunque con una vida media muy corta como el Carbono-14 y otras extremadamente largas como Uranio-238.

Para saber la antigüedad de los yacimientos se utilizan isótopos de vidas medias muy largas. Los geocronologistas usan pares de átomos para la datación de edades tales como el Potasio-Argón, Rubidio-Estroncio y Uranio-Plomo en virtud de que el segundo es descendiente radiactivo del primero.

El potasio-40 al decaer da lugar al nacimiento del argón-40, que tiene una vida media de más de 1 260 000 000 de años. Este isótopo radiactivo padre genera a sus descendientes muy lentamente, en el transcurso de millones y millones de años. Al analizar una muestra de acuerdo con la presencia del isótopo hijo, sea radiactivo o no, puede determinarse, con ayuda de las leyes del decaimiento radiactivo, el tiempo transcurrido desde la formación del yacimiento. En este caso, una mayor cantidad del isótopo descendiente indica una mayor antigüedad de la muestra.

Para la determinación de la antigüedad de las cuencas sedimentarias el mas apropiado podría ser el Potasio-Argón y que puede aplicarse a la glaucomita autógena por su contenido de potasio y que se encuentra accesoriamente en las rocas sedimentarias. Pero el método más empleado para rocas sedimentarias, es por la zonación bioestratigráfica que da una datación relativa en base a la distribución de fósiles guías de ocurrencia frecuente en las rocas sedimentarias).

Con estos criterios podemos estimar la antigüedad de las formaciones y ubicarlas en una determinada edad y era geológica según los cuadros de edades geológicas que se muestra en la sección de tablas.

Una evaluación geológica también requerirá del uso de ciertas herramientas tales como:

4.2.1.1 Estudios de Sísmica Regionales

Produciendo artificialmente ondas de sonido y detectando los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas, se puede obtener una imagen muy aproximada de las discontinuidades sísmicas. Estas discontinuidades coinciden generalmente con las discontinuidades estratigráficas. Es decir inferir información sobre la composición del subsuelo mediante algún parámetro físico medido en superficie, que puede ser la velocidad de una onda mecánica. Dentro de este concepto, los métodos geofísicos, aprovechan las propiedades físicas de las rocas en la búsqueda de yacimientos.

Los métodos sísmicos se dividen en dos clases:

El método sísmico de reflexión es el más empleado en prospección petrolífera ya que permite obtener información de capas muy profundas. Permite definir los límites del acuífero hasta una profundidad de 100 metros, su saturación (contenido de agua), su porosidad. Permite también la localización de los saltos de falla.

El método sísmico de refracción es un método de reconocimiento general especialmente adaptados para trabajos de ingeniería civil, prospección petrolera, y estudio hidrogeológicos. Permite la localización de los acuíferos (profundidad del sustrato) y la posición y potencia del acuífero bajo ciertas condiciones.



Las ondas sísmicas son ondas mecánicas y elásticas, que causan algunas deformaciones no permanentes en el medio, en que se propagan. La deformación se refiere a una alternancia de compresión y de dilatación de tal manera que las partículas del medio se acercan y se alejan respondiendo a las fuerzas asociadas con las ondas, como por ejemplo en un elástico extendido. Su propagación se describe por la ecuación de ondas. La velocidad de la onda sísmica depende de los parámetros elásticos del medio, formación o estrato, en que se propaga la onda. Los criterios que se toman en cuenta son las velocidades que logran de acuerdo a la dirección de propagación y estos valores se usan en diversas ecuaciones para poder estimar propiedades del subsuelo. Las propiedades de las rocas que influyen en la variación de estos parámetros son:

- Contenido de Minerales (petrología).
- Estado de compactación.
- Porosidad.
- Textura y estructura de la roca.
- Temperatura.
- Presión.

La variación en una de estas propiedades de la roca, se puede interpretar como por ejemplo con un límite entre dos estratos litológicos, con una falla o una zona de fallas, o también como un cambio en el fluido contenido en el espacio poroso de la roca. Los métodos geofísicos pueden dar informaciones sin hacer una perforación de altos costos; pero todos los métodos geofísicos dan solamente informaciones indirectas, es decir nunca sale de una muestra de roca. Los resultados de investigaciones geofísicas son hojas de datos (números) que esperan una interpretación.

4.2.1.2 Estudios de Otros Métodos de Prospección Geofísica en Superficie

Métodos Eléctricos

Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de las rocas y minerales, y más especialmente su resistividad. Generalmente, emplean un campo artificial eléctrico creado en la superficie por el paso de una corriente en el subsuelo.

Se emplean como métodos de reconocimiento y de detalle, sobre todo en prospección de aguas subterráneas. Los mapas de iso-resistividad permiten definir los límites del acuífero, el nivel del agua en los acuíferos, la presencia de agua salada y permite la cartografía de las unidades litológicas.

Métodos Electromagnéticos

Los dos métodos mas utilizados en estudios hidrogeológicos son:

- Very Low Frequency (VLF): Medidas electromagnéticas que permiten delimitar las fracturas o fallas de un acuífero. Particularmente útil en caso de estudio de acuíferos fracturados como los sistemas kársticos.
- Sondeos Electromagnéticos en el dominio temporal (SEDT o TDEM en inglés): El método tienen ventajas sobre métodos electromagnéticos entre otras por su capacidad de mayor poder de penetración que permite obtener información a mayores profundidades.

4.2.1.3 Información de Registros Eléctricos y Litológicos de Pozos Exploratorios y de Pozos en Producción

El estudio geofísico permitirá determinar el mejor sitio para la perforación de pozos. El pozo (en este caso el exploratorio) debe estar situado en la zona mas profunda del yacimiento o lote en explotación para permitir obtener una información de toda la columna estratigráfica. En el transcurso de la perforación se efectuará el control del lodo, principalmente en lo que tiene relación al peso específico, viscosidad y contenido de arena, el registro de la rata o tiempo de penetración y la toma de muestras litológicas cada metro de avance para el análisis macroscópico.

En forma simultánea, durante la perforación exploratoria se llevará un control continuo de algunos parámetros mediante perfiles eléctricos.

Una diagráfia, compila todos los datos levantados en un pozo, es decir a lo largo de un corte vertical por el subsuelo. En una diagráfia geológica se compila las propiedades geológicas,

mineralógicas y estructurales de los distintos estratos como el tamaño de grano, la distribución del tamaño de grano, la textura de las rocas, su contenido en minerales, su contenido en fósiles, su estilo de deformación.

En una diagráfia geotécnica se compila las propiedades mecánicas de las rocas de un pozo como por ejemplo su grado de resistencia, la tensión de cizallamiento y la cantidad de fracturas por unidad de volumen.

Las técnicas aplicadas en las perforaciones se desarrollaron independientemente de los métodos geofísicos empleados en la superficie, pero tomando como referencia los sondeos realizados durante la fase de exploración, donde los métodos geofísicos contribuyen a la correlación estratigráfica y al levantamiento geológico. La diagráfia geofísica comúnmente entrega datos múltiples sacados mediante un único proceso de medición. Estos datos incluyen informaciones litológicas, estratigráficas y estructurales, indicadores de la mineralogía y de la concentración de los estratos e indicadores para la exploración geofísica a partir de la superficie. Los parámetros medidos permiten la determinación de las características físicas de las rocas como la porosidad, la permeabilidad y también, otras como la velocidad y dirección de flujos.

Los Registros Eléctricos mas utilizados en Hidrogeología son los siguientes:

- Registros de gamma ray o diagráfia de rayos naturales de gamma: Es el método más importante en hidrogeología.

Permite obtener información sobre los límites de capas y el contenido de arcillas.

- Potencial espontáneo (S.P.): Este método se utiliza de manera puntual para resolver los problemas de límites del acuífero o movimiento del agua. Da la conductividad de las formaciones y permite definir la velocidad y dirección del flujo.
- Registro Neutron: una diagragía de neutrones, este emplea una fuente, que emite neutrones y un detector correspondiente. Permite obtener la porosidad.
- Sónico (de velocidad acústica): Informa sobre fracturación y litologías, especialmente en acuíferos carbonatados, rocas ígneas o metamórficas.
- Temperatura: Permite la identificación de acuíferos, aportes de aguas de diferentes temperaturas, gradiente térmico.

4.2.1.4 Mapas Geológicos

Los mapas geológicos y geomorfológicos son, además de una fuente de información científica notable; una herramienta necesaria para la toma de decisiones ante los múltiples problemas ambientales que se puedan relacionar con la utilización del territorio.

Los rasgos geológicos o geomorfológicos representados en un mapa aportan una información de evidente interés científico. La mayor parte de las cartografías temáticas se obtienen a partir de una información topográfica y geológica básica. Cuando un

especialista elabora un mapa temático, suelen plantearse distintos tipos de problemas: ¿Cuáles son las zonas inundables de un territorio? ¿Cuál es la localización más adecuada para un vertedero de residuos urbanos y de otros fluidos residuales? ¿Es razonable realizar una captación de agua subterránea en un determinado lugar?, entre otras interrogantes.

Para resolver estas y otras muchas cuestiones, el experto suele seleccionar un conjunto de características representadas previamente en un mapa. A partir de ellas debe buscar nuevos datos hasta conseguir un conjunto acotado de variables que resulten significativas y que, una vez integradas, permitan una nueva representación cartográfica capaz de responder a la pregunta formulada. De este modo se elaboran los mapas de riesgos naturales, los mapas de vulnerabilidad, los mapas hidrogeológicos, los mapas geotécnicos, entre otros.

Los elementos representados en los mapas geológicos pueden ser puntuales, lineales o superficiales. Los primeros son la plasmación gráfica de datos aislados, como por ejemplo la localización de manantiales. Los elementos lineales representan rasgos de escasa amplitud como, por ejemplo, la red fluvial o el eje de un pliegue. También se obtienen representaciones lineales de la intersección de planos con la superficie del terreno; tal es el caso de una falla o de un límite entre capas.

Los elementos representados como superficies reflejan características que se manifiestan sobre el terreno con cierta amplitud areal como por ejemplo las diversas litologías, la edad de las formaciones geológicas o las unidades del relieve. Aunque los

datos geológicos suelen representar únicamente la parte más somera del terreno, de ellos se puede extrapolar la disposición en profundidad de distintos materiales y estructuras.

Algunos mapas se denominan de “isolineas” cuando sus trazos representan la distribución de franjas de igual valor o magnitud de un determinado conjunto de datos. El mapa topográfico es un mapa de isolineas por excelencia puesto que representa los valores de igual cota. También es un mapa de isolineas el mapa piezométrico o el de isóbatas del substrato de una determinada cuenca sedimentaria (Ver Apéndice “B”).

4.2.1.5 Mapas Geomorfológicos

Los mapas geomorfológicos representan las formas producidas por los procesos geodinámicos sobre las zonas más superficiales de un determinado territorio. Para su realización es preciso recurrir a la cartografía directa de las formas identificadas en el campo, si bien esta labor se ve enormemente apoyada en el análisis del mapa topográfico y en las técnicas de fotointerpretación de imágenes aéreas y de satélites. A diferencia de los mapas geológicos, la cartografía geomorfológica no permite extrapolar datos a una profundidad muy grande. Facilita información sobre la edad de las formas representadas y sobre la relación entre éstas con los procesos que las han generado y los factores que han influido en su origen.

Algunas características geomorfológicas cuantificables como la pendiente, el grado de alteración, las tasas de erosión o la orientación de las laderas, entre otras, pueden ser cartografiadas cuando se definen intervalos de valores y éstos son representados

en un mapa. En algunos estudios de síntesis se realizan mapas de unidades geomorfológicas que distinguen sectores de un territorio atendiendo a un conjunto de características físicas comunes. Algunas unidades geomorfológicas son: Colinas Bajas, Flancos Estructurales, Colinas Altas, Valles, Terrazas Aluviales, Llanuras entre otros.

Los rasgos geológicos y geomorfológicos representados en los mapas definen la disposición superficial, la profundidad de materiales y estructuras y delimitan las distintas unidades morfodinámicas. A partir de la integración de distintas variables (propiedades geotécnicas, porosidad, permeabilidad, transmisividad, índice de peligrosidad frente a un riesgo), es posible una interpretación correcta para evaluar **la vulnerabilidad del terreno** frente a la contaminación o afectación de los recursos naturales. La ubicación de actividades potencialmente contaminantes como los vertederos de residuos, las gasolineras, las compañías operadoras, requiere a menudo, de criterios científicos objetivos que permitan determinar la idoneidad de la implantación de sus proyectos.

Entonces, la cartografía geológica y geomorfológica constituye una base imprescindible para la gestión racional del medio, de la que se derivan unos beneficios no sólo económicos, sino también culturales, sociales y ambientales.

4.2.2 EVALUACION HIDROGEOLOGICA

La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, y evacuación (Mijailov, 1989).

El agua subterránea es el agua que circula en la zona saturada de los acuíferos y que es posible de captar por obras de ingeniería como fuentes subterráneas de agua potable (pozos, drenes).

El conjunto de investigaciones hidrogeológicas que han de realizarse debe proporcionar una base segura para la ejecución de las estimaciones y pronósticos cuantitativos del recurso hídrico subterráneo.

Para evaluar y comprender el comportamiento del acuífero en el área de estudio, es importante obtener la mayor cantidad de datos sobre la forma de ocurrencia del agua subterránea (acuíferos libres, confinados o semiconfinados); profundidades del nivel del agua subterránea; características físicas del estrato que contenga al acuífero, espesores de los materiales, litología de los estratos, química de las aguas y parámetros hidráulicos. Por lo tanto es necesario realizar los dos siguientes estudios:

4.2.2.1 Estudios geológicos en el Ámbito Hidrogeológico

El conocimiento geológico se obtiene partiendo del contexto regional hacia el contexto local, para una mejor visión y análisis integral de la situación.

Para estudios hidrogeológicos es preciso conocer la litología de las formaciones y sus características. La geología utiliza información de campo, toma de muestras de rocas, medidas de indicadores de estructura (forma en la que han sido depositadas las rocas, es decir, como están colocadas) y deben coincidir con la información colectada durante la perforación de pozos, **trabajos de geofísica** y/o estudios de sensores remotos (fotografías aéreas e imágenes satelitales).

Los cortes geológicos aportan información relevante sobre las estructuras profundas de las diferentes formaciones y especialmente para el volumen de los acuíferos. También, el muestreo del material de perforación (testigos o cores) permite una descripción de los estratos atravesado. La estimación de la salinidad lo obtendríamos midiendo la conductividad eléctrica del lodo de perforación.

El análisis granulométrico de las arenas acuíferas es muy importante porque además de proporcionar datos de parámetros hidráulicos estimados, brinda información para el diseño del pozo inyector.

Las fotos aéreas, imágenes de satélites y fotos de vuelos a baja altura, pueden observar la superficie de la tierra, tienen la ventaja de una visión en conjunto del área de trabajo y demuestran ser una herramienta importante para obtener información de indicadores, que son útiles para la búsqueda de las aguas subterráneas. Estos permiten elaborar una serie de mapas que guían a la elaboración final de un mapa integrado. Las unidades morfológicas pueden ser bien identificadas con las fotografías

aéreas. Las imágenes de satélites son un buen complemento de las fotos aéreas debido a que dan una información adicional sobre el tipo y el estado en determinado tiempo de la vegetación por medio de los colores. Por lo tanto, una imagen satelital cubre un área mayor que una foto aérea y da una visión general instantánea (Apéndice “A”).

Las interpretaciones tienen que ser comprobadas con verificaciones de campo, para obtenerse elementos confirmativos debido al posible potencial de agua subterránea en las diferentes áreas de estudio.

En resumen, los estudios geológicos (estratigrafía, sedimentología, análisis estructural, petrología, geoquímica) permitirán definir la naturaleza y características de las formaciones presentes, los límites del acuífero o de los acuíferos y su volumen aproximativo; la calidad de las formaciones (permeables, semipermeables, geoquímica) y la presencia de varias capas. Permiten establecer mapas de facies, estructurales en isohypses (igual altitud) del techo y base del acuífero, curvas isopacas (igual espesor). Esta información constituye la base de los estudios hidrogeológicos.

4.2.2.2 Caracterización Hidrodinámica del Acuífero

Para completar los estudios geológicos e hidrogeológicos y confirmar hipótesis de trabajo, es necesario hacer una caracterización del estrato que contiene al acuífero y definir su dinámica. El estudio de la hidrodinámica permite identificar y clasificar los tipos de acuíferos, precisar la dinámica del agua, establecer modelos de flujos subterráneos, precisar las interconexiones con los medios adyacentes, y respuesta del

acuífero a incitaciones exteriores. La definición de la calidad y estudio del uso de las aguas para los diversos fines (abastecimiento humano, industrial, agricultura u otros usos como disposición de fluidos residuales) brinda herramientas para la protección adecuada de los acuíferos. **(Ver apéndice “B”)**

Para establecer las características hidrodinámicas del acuífero es necesario establecer mapas piezométricos (nivel del agua en el acuífero). Por eso es indispensable iniciar el trabajo de campo con el censo de los pozos y sondeos existentes, los cuales deben estar geográficamente referenciados (datos GIS).

La posición del nivel del agua dentro de cada pozo permitirá establecer mapas de isopiezas freáticas. Es necesario tener suficientes puntos de medición y verificar que en cada pozo se puede medir el nivel natural del agua en el acuífero y no su nivel dinámico. La superficie piezométrica representa el límite superior del acuífero, el cual varía en el tiempo y el espacio. Por esto es necesario tener una red de medición la mas densa posible y efectuar el monitoreo varias veces al año para tener una idea de la dinámica del acuífero y su evolución temporal bajo efectos de explotación de las aguas o cambios naturales (sequías, movimientos de terreno, etc.). El monitoreo de los niveles piezométricos permite conocer el sentido del flujo, la interconexión y límites de acuíferos. **(Ver apéndice “B”)**

El conjunto de las técnicas (geología, geofísica, balance hídrico, hidroquímica) permite definir las relaciones entre las capas, entre acuíferos ríos/lagos, tasa de recarga y descarga, tiempo de residencia, direcciones de flujo y variaciones de la recarga, además el cálculo de los coeficientes de permeabilidad (K), la

transmisividad (T) y la difusividad del acuífero. El caudal (Q) del acuífero se puede definir a partir de los mapas piezométricos o de la sección total o elemental.

La velocidad efectiva de escorrentía (V_e), velocidad de filtración se obtienen por cálculos a partir de la información previamente obtenida y por la cual los estudios hidrogeológicos descritos son indispensables. Los trazadores naturales o artificiales pueden ayudar a definir estos parámetros.

Los ensayos de lugar como los ensayos de acuíferos y pruebas de bombeo, son pruebas; que consisten en modificar el comportamiento hidrodinámico del acuífero, en respuesta a una impulsión creada por un bombeo a caudal constante. El ensayo de acuífero permite determinar las características del acuífero para permitir la definición del equipo técnico que se va a instalar en el pozo. Las pruebas de bombeo permiten la medida in-situ de los parámetros hidrodinámicos del acuífero como transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento. Estos ensayos permiten el estudio de las características particulares de los acuíferos como las condiciones a los límites, estructura, heterogeneidad, entre otros.

4.2.3 EVALUACION DE RESERVORIOS

4.2.3.1 CALIDAD DEL AGUA PRODUCIDA

La Geoquímica del agua producida inyectada y su compatibilidad con el agua connata y otros tipos de aguas dentro de la formación de inyección es una información específica a considerar. La concentración y la distribución del tamaño de partículas de hidrocarburos dispersados y sólidos suspendidos son importantes características tanto para el tratamiento del agua como para la inyectividad. Además, el agua producida contiene un amplio rango de materiales disueltos y suspendidos que pueden afectar la inyectividad. Esto en resumen abarca:

- Cationes (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca_2^+ , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+})
- Aniones (Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , BO_2^- , NO_3^- , OH^- , PO_4^{3-})
- Ácidos grasos (Formic, Acetic, Prop ionic, Butyric, Valeric)
- Gases disueltos (CO_2 , H_2S , O_2)
- Temperaturas
- Valores de pH.
- Hidrocarburos (dispersos y disueltos)
- Total de sólidos libres suspendidos en el crudo.

Otras propiedades del agua producida relevantes para la inyectividad, son:

- Distribución del tamaño de partículas
- Capacidad de filtrarse o inyectarse en las paredes del pozo.

En algunas estructuras regulatorias pueden haber requerimientos de información de otras características que naturalmente ocurrieron

o información química en trabajos de producción/work over. Estos datos puede ser también importante en acuerdos de protección o planes de contingencia a ser realizados si el proceso de inyección fallara.

La información que se detalla a continuación, facilitará el diseño de la inyección de aguas producidas de acuerdo al alcance de los objetivos de la inyección. Además esta información será considerada si se desea solucionar problemas corrosivos y si se desea en un futuro realizar intervenciones a los pozos inyectoros (Ej. Estimulaciones):

- Gravedad Específica del agua Producida.
- Gravedad Específica del os Hidrocarburos producidos
- Total de sólidos disueltos
- Acción corrosiva del agua
- Conductividad del agua
- Propiedades reológicas del petróleo separado del agua producida.
- Análisis microscópico de los sólidos separables
- Análisis químico de los sólidos separables.
- Características de las Formas de Tratamiento de Aguas (Decantación, Flotación, Hidrociclones, etc.)

4.2.3.2 PROCESOS DE MONITOREO Y CONTROL

Las exigencias regulatorias de las autoridades o entidades fiscalizadoras, en relación a los requerimientos de monitoreo y verificación del “control” de los procesos de inyección; varia considerablemente de acuerdo al lugar donde se realicen. En cualquier caso, la compañía operadora debe establecer un

programa de monitoreo designado a asegurar que el proceso de inyección esta llevándose a cabo según lo planeado.

Basados en los objetivos del proyecto de inyección (por ejemplo almacenar el fluido inyectado dentro de la formación y/o acuífero elegido), el operador puede definir el rango de las situaciones de conformidad y de fallamiento. Conjuntamente con la ingeniería de procesos de inyección, podemos diseñar un adecuado programa de pruebas y de supervisión. El programa deberá ser capaz de identificar fallas en los procesos de inyección y formar las bases de datos con la finalidad de analizar y configurar las acciones a llevar a cabo en esta operación.

4.2.3.2.1 MONITOREO A PRESION CONTINUA

Una comparación entre la presión actual y la presión planeada es inicialmente lo que debemos hacer, para validar el modelo de variación y establecer un programa de monitoreo de presión aceptable.

Una representación muy útil es el *Hall Plot*, que muestra la presión multiplicada por la duración de la inyección versus el volumen inyectado. Una línea recta es la esperada y demuestra que se esta efectuando una inyección constante, cuando en un determinado momento se genere una curva hacia arriba esto indicará una pérdida de transmisividad. Una indeseada propagación de fractura se generará cuando en el Hall Plot la línea recta inicial tienda a disminuir su pendiente.

Estudios iniciales de ingeniería proporcionarán las presiones de superficie necesarias para desarrollar una operación confiable, ya sea que estén dadas por las

limitaciones tubulares del pozo o por presiones de fractura.

Entonces, el programa de monitoreo puede ser establecido tomando como base los estudios iniciales y los siguientes datos:

- Presión inicial de cierre del pozo en superficie.
- Presión de inyección en superficie del pozo versus rate de bombeo.
- Presiones provenientes de una prueba Fall-off.
- Presiones circulares de pozos inyectoros circundantes.

4.2.3.2.2 PRUEBAS DE INYECTIVIDAD Y PRUEBAS FALL-OFF

Las mediciones en campo proporcionan información para modelar el movimiento frontal del fluido y para establecer una apropiada presión de inyección. Debe tenerse mucho cuidado al interpretar los resultados de las pruebas, ya que una apropiada presión de operación puede diferir de la presión inicial de propagación de una fractura. Esto es porque inyectar un líquido relativamente tibio dentro de un horizonte inyector de poca profundidad, requerirá una presión mayor que la estimada para propagar una fractura en el horizonte. Sucederá algo contrario cuando el fluido a inyectar este relativamente frío.

Los objetivos de las pruebas de inyectividad y de Fall-off son para:

- Medir la presión del reservorio, presión de propagación de fractura, presión de cierre.
- Determinar el comportamiento de la transmisividad de la formación. (por ej: dimensiones de fractura y permeabilidad horizontal).
- Confirmar la cantidad de flujo que admite la formación en inyectarse.

Una descripción mas detallada de pruebas de inyectividad y Fall-off se encuentra en el apéndice “C”.

4.2.3.2.3 POZOS DE OBSERVACION Y/O VIGILANCIA

Si se dispone de pozos de observación dentro del yacimiento, una vigilancia lenta de tipo acústico (microsísmica) con receptores ubicados en el fondo de estos pozos de observación, puede proporcionar información acerca del aumento de fracturas. Probadores de presión y de fluidos pueden dar información del flujo de fluidos.

4.2.3.2.4 FLUIDOS DE INYECCION

Según lo establecido en lo referente a la calidad del agua, la calidad de los fluidos inyector es importante para mantener la inyectividad. Una descripción completa de la composición de los fluidos inyector, nos proporcionaría información valiosa en caso se observe que la inyectividad disminuye. El Monitoreo regular a las propiedades de los fluidos inyector, puede incluir:

- Temperatura

- pH
- Contenido de sólidos
- Contenido de hidrocarburos dispersos y disueltos
- Salinidad

4.2.3.2.5 ASPECTOS MECANICOS

Monitorear la integridad mecánica de los pozos de inyección y de otros inyectores cercanos, es vital para una apropiada operación de inyección del agua producida. Los métodos aplicables para evaluación de integridad mecánica (por ejemplo: detección de filtraciones en tuberías, casing o en empaques, o detección de filtraciones en la parte cementada de los casings) pueden incluir lo siguiente:

- Monitoreo de presión anular
- Pruebas de presión
- Registro de temperaturas
- Registro de ruidos
- Programa de Análisis de tuberías
- Relevamiento por medios electromagnéticos del espesor de los estratos.
- Registro de calibraciones
- Observación de las paredes del pozo
- Relevamiento de los medidores de flujo
- Programa de análisis de seguimiento radioactivo
- Registro de activación de oxígeno
- Registro de adherencia del cemento.

Como un procedimiento de rutina; el monitoreo de la presión, de los rates de inyección y de las presiones anulares entre el casing y la tubería de presión, puede proporcionar indicadores del status de la integridad mecánica del pozo de inyección sin interrumpir las operaciones de inyección. Los cabezales de producción, los casings y las tuberías pueden también ser monitoreadas para detectar signos de erosión o corrosión, pero estas operaciones pueden requerir de la suspensión de las operaciones de inyección.

Si alguna filtración fuera detectada, paralizar las operaciones de inyección y ejecutar una prueba simple de integridad mecánica en el espacio anular, para confirmar el problema. Luego, puede ser significativo realizar una verificación de los registros mencionados en la lista anterior. De estas técnicas, los registros de ruidos (4) y temperaturas (3), así como el programa de análisis de seguimiento radioactivo (10); tienen la capacidad de detectar filtraciones en tuberías, casings o empaques, así como detectar movimiento de fluidos en las partes anulares cementadas de los casings.

4.2.3.3 PROBLEMAS OPERACIONALES

La elaboración de planes de contingencia es parte integral, del trabajo de preparar una operación de inyección del agua producida. Diferentes modos de riesgos potenciales deberían ser evaluados a lo largo de toda la fase de planificación con las acciones de remediación necesarias que ayuden a mitigar los riesgos. Las siguientes secciones precisan algunos ejemplos de riesgos potenciales.

4.2.3.3.1 AUMENTO DE PRESION (BUILD UP)

Existen dos casos distintos: una rápida e inesperada subida de presión, o un lento incremento de la presión de inyección como resultado de una baja en la inyectividad. Las presiones pueden ser monitoreadas para asegurar que éstas no excedan a la presión de inyección máxima permitida.

i. Una rápida subida de la presión generalmente será el resultado de un bloqueo del área de ingreso de fluido causada por el agua de producción que se inyecta, el cual contendría una gran cantidad de materiales inesperados y no deseados (por ejemplo: sólidos o emulsiones), o sino por un inesperado problema de compatibilidad del agua de formación y la formación y/o acuífero a inyectar. Se ha demostrado en algunos campos de operaciones que la pérdida de inyectividad durante la inyección de agua producida debido a taponamientos es solucionable, por ejemplo; una mejora en la calidad del agua de inyección permitirá una mejora en la ejecución de pozos inyectoros. Esto implica que en algunos casos los niveles de operación de disposición de flujos de agua puede ser mejorado mediante perfeccionamientos en el tratamiento de aguas producidas o mediante el establecimiento de pozos cíclicos entre la inyección de aguas producidas y la inyección de algún otro tipo de agua (disponible y compatible) sin tener la necesidad de recurrir a procesos de Workovers. En el caso de que este procedimiento resultara infructuoso, (por ejemplo: el caso de pérdida de inyectividad producida por la aplicación del mencionado procedimiento), o no factible (por ejemplo: la inexistencia

de una fuente de agua de inyección alternativa), la causa del taponamiento debe ser determinada y remediada de ser considerada la continuación del uso del pozo. Entonces las acciones de inyektividad de los pozos pueden ser restaurados por medio de un “Back Flowing” (Flujo de fluidos dentro del pozo a partir de una “zona” hacia otra en respuesta a una diferencia de presiones entre ambas zonas. Un “Backflow” ocurrirá en cualquier momento, si la presión en el pozo aumenta sobre la presión media de la zona), estimulaciones convencionales o a través de fracturamientos hidráulicos.

ii. Un lento aumento en la presión, lo cual no está dentro de los modelos de estudios de valores predictivos, puede ser causada; ya sea por características del agua del reservorio diferentes a las asumidas o sino por la calidad del agua fuera de las especificaciones. En el primer caso las características del agua de formación del reservorio deben ser verificadas y si se encuentra que existen diferencias entre los valores hallados y los valores asumidos, los estudios deben replantearse y las especificaciones de calidad del agua deben ser redefinidas. En el segundo caso los niveles de operación de las instalaciones de superficie deben ser revisados/investigados y acciones correctivas deben ser puestas en práctica donde sea necesario.

En el caso de fracaso en la prevención o corrección de un alza en la presión (la presión va referido a presiones tipo Build-Up), la operación de inyección puede continuar siempre y cuando, los niveles máximos de operación permitidos no sean rebasados. En algunos casos tal

situación se torna gradualmente más difícil de remediar, y el pozo debe ser (prematuramente) abandonado.

4.2.3.3.2 PROBLEMAS DE CONFINAMIENTO

Para los programas donde la inyección por fracturamiento ha sido analizada y el confinamiento de la zona fracturada y los fluidos inyectados han sido confirmados; la pérdida de inyectividad, puede ser mitigada mediante el incremento de presiones de inyección, esto a su vez, permitirá la iniciación y/o propagación de fracturas hacia las caras de rocas limpias. De modelos predictivos, el operador se habrá dado cuenta de que la conformidad vertical puede mantenerse, y que el crecimiento de fracturas puede ser contenido. Sin embargo, problemas de confinamiento no esperados (no-planeados) pueden ocurrir.

Problemas de confinamiento pueden manifestarse por sí mismos por medio de perturbaciones en la presión y/o mediante efectos transitorios. Algunos problemas que pueden presentarse son:

- Fallamiento de otras partes anulares cementadas
- Fallamiento de partes anulares internas

Una rotura de algún medio de confinamiento es un indicador para pensar en una acción de remediación. Las posibles acciones a tomar incluyen remediar las partes cementadas, aislar el horizonte de inyección y reperforar en otro horizonte, ya sea perforando el mismo pozo existente, desviando la perforación en un determinado ángulo (Side Track), etc. Si el pozo no pudiera continuar siendo usado para inyectar agua producida, acciones correctivas incluyen

en abandono del mismo. La figura 4 muestra las acciones correctivas a ser tomadas en el caso de problemas de confinamiento.

4.2.3.3.3 *COMPLICACIONES MECANICAS*

Filtraciones no deseadas pueden ocurrir debido a fallas mecánicas (corrosión y/o erosión) de los pozos, empaques, tuberías o casings. Si los cabezales de superficie del pozo o los casings, resultaran dañados y no están en capacidad de contener presión; las reparaciones pertinentes, en el pozo, deben ser llevadas a cabo (Workovers). Si la sarta de tuberías han sido comprometidas, reparaciones o nuevos procesos de completación de los pozo deben ser consideradas, dependiendo de la evaluación de las consecuencias de la falla en particular y/o de la probabilidad de que vuelva a fallar, cuando operaciones de inyección vuelven a ser ejecutadas.

4.2.3.3.4 *ESTRATEGIAS ALTERNATIVAS*

En algunas circunstancias, puede ser necesario el suspender la inyección por períodos largos de tiempo o aún mas; terminar las operaciones de inyección. Procesos de Planeamiento, es necesario y debe estar listo para implementar estrategias alternativas de manejo de aguas producidas. Es aconsejable tener algunas de dichas estrategias listas y coordinadas de antemano, con protocolos y regulaciones de operaciones debidamente

aprobadas, de manera que se puedan evitar innecesarias e indeseadas interrupciones.

4.2.4 EVALUACION AMBIENTAL

4.2.4.1 PRELIMINARES

Los asuntos ambientales están adquiriendo una creciente importancia en todo el mundo, como resultado de la gran conciencia desarrollada por las poblaciones y de la preocupación y presión de los gobiernos. Asimismo, las operaciones individuales dentro de la industria del petróleo están desarrollando cada una de ellas sus propias acciones de protección del medio ambiente a la par de sus operaciones respectivas.

El agua producida, es uno de los productos residuales en mayor volumen dentro de la industria del petróleo y gas durante la fase de producción de los campos de petróleo y gas. Este producto residual tiene diferentes denominaciones tales como "salmuera de campo petrolero", "agua salada", "agua producida", entre otras. Cada día deben manipularse millones de barriles de agua conteniendo grandes cantidades de sales disueltas, sólidos en suspensión, metales pesados e hidrocarburos dispersos y disueltos.

Dentro de la variedad de métodos para disponer y/o eliminar las aguas producidas en las operaciones petroleras, existe la alternativa de reinyectar estos fluidos dentro de una formación estratigráfica en el sub-suelo previas evaluaciones que acrediten que este proceso de inyección no cause alguna contaminación a fuentes acuíferas subterráneas de uso doméstico para las poblaciones cercanas.

La agencia de protección del medio ambiente (E.P.A.) de ESTADOS UNIDOS, fue establecida en 1970 para consolidar en una sola agencia una variedad de actividades federales de la investigación, supervisión, estandarización y de la aplicación para asegurar la protección del medio ambiente. La misión de EPA es proteger la salud humana y salvaguardar el ambiente natural, aire, agua y tierra; sobre la cual depende la vida.

Los siguientes puntos establecen los estándares y criterios técnicos, para un Programa de Control de Inyección de Fluidos en el Subsuelo. Las leyes que autorizan estos criterios y estándares técnicos, son supervisadas por una “Comisión para la Seguridad de las Aguas de Consumo Humano” (*siglas en ingles* USDW); entidad gubernamental norteamericana que fija los estándares para la calidad del agua potable y supervisa a los estados, a los lugares, y a surtidores del agua que ponen esos estándares en ejecución.

4.2.4.2 PROGRAMA DE CONTROL

La E.P.A. (Environmental Protection Agency), establece criterios y estándares técnicos para un programa de control de inyección en el sub-suelo de las aguas producidas conjuntamente con el petróleo y gas. La inyección de las aguas producidas, dentro de una formación subterránea a elegir (acuífero); es una alternativa de manejo ambiental para la disposición final de estas aguas sin ocasionar posibles contaminaciones a algunas fuentes subterráneas de uso doméstico. Los pozos que se acondicionarán o serán construidos con estos fines, son clasificados según la E.P.A. como pozos Clase II.

Los criterios y estándares técnicos a seguir según las regulaciones de la E.P.A. para la construcción (y/o acondicionamiento de un pozo

existente), monitoreo y abandono de pozos Clase II; se detallan a continuación:

4.2.4.2.1 ACUIFEROS CANDIDATOS, INVULNERABLES O INAFECTOS

Un Acuífero viene a ser un elemento de almacenamiento, de disposición o recepción de fluidos; a su vez, una formación geológica, conjunto de formaciones, o parte de una formación que es capaz de aportar una cantidad considerable de agua a un pozo o como fuente de empuje o energía a un reservorio de hidrocarburos. Dentro de este amplio concepto de acuífero, se ha propuesto considerar los siguientes criterios para que un acuífero existente en el sub suelo, sea evaluado y elegido como un lugar de inyección de fluidos sin correr riesgos de que genere una contaminación ambiental. Los criterios son:

- Acuíferos que no sirvan actualmente, como fuentes de agua potable.
- Acuíferos que no pueden, ni podrán ser una fuente de agua potable debido a los siguientes aspectos:
 - Es una fuente de energía para producir hidrocarburos y/o minerales.
 - Este situado a una profundidad o lugar, donde el propósito de recuperar el agua contenida en ese acuífero, con objetivos para consumo

humano; sea tecnológicamente y económicamente no viable.

- Un acuífero, en donde la probabilidad técnica y económica de evaluar si su contenido está o no contaminado; no sea rentable.
- Este localizado sobre un área minera y dependiente de un área o locación removible por acciones geológicas.
- El contenido total de sólidos disueltos en el agua que contiene es mas de 3 000 y menos de 10 000 mg. /litro y no es adecuado para ser considerado una fuente de agua potable.

4.2.4.2.2 POZOS DE INYECCION CLASE II

La E.P.A. ha generado una clasificación de pozos inyectores (nuevos o acondicionados) de acuerdo al tipo de fluido a inyectar. Para el caso que estamos tratando, los pozos identificados como Clase II según la E.P.A.; son aquellos que involucra a pozos que pueden inyectar **fluidos de las siguientes consideraciones:**

- Fluidos que llegan a superficie en conexión con la producción de petróleo o de gas natural, o mezclados con aguas residuales procedentes de plantas de gas las

cuales son parte integral de sus operaciones de producción; menos aquellas aguas que sean consideradas como desechos tóxicos al momento de decidir su inyección.

- Fluidos que se usan para procesos de Recuperación Secundaria en actividades de explotación de petróleo o gas natural.
- Hidrocarburos en estado líquido a temperaturas y presiones estándares y sean almacenados en el subsuelo por un periodo determinado.

4.2.4.2.3 AREA DE REVISION PARA POZOS CLASE II

El área de revisión va referido a los criterios a tomar en cuenta, de los alrededores del lugar donde se proyecta establecer y/o construir el pozo de inyección. Estos criterios son:

4.2.4.2.3.1 Zonas a Influir con Peligro

i. Zonas a influir con peligro, podrían ser:

Dentro de un radio de avance en distancia lateral al pozo inyector, en las cuales las presiones de inyección puedan causar la migración del líquido de inyección o de los fluidos de formación contenidos en el, hacia alguna fuente subterránea de agua potable existente, ó

Dentro del área de proyecto más un área alrededor de la anterior de un espesor considerado, y que los fluidos a inyectar drenen en la distancia lateral total de ambas

áreas, con peligro de generar una conexión a una fuente subterránea de agua potable existente.

- ii. El cálculo y estimación de las zonas a influir con peligro; puede estar basado en variables tales como, la conductividad hidráulica de la zona de inyección, espesor de la zona de inyección, tiempo de inyección, coeficiente de almacenamiento, rate de inyección, potenciales hidrostáticos, gravedad específica del fluido a inyectar entre otros; y debe ser calculado para un período de inyección igual a la vida prevista del pozo inyector a usar o a un modelo determinado.

Las ecuaciones de cálculo del radio de avance del fluido de inyección están basadas en las siguientes asunciones:

- a. La zona de inyección es homogénea e isotrópica.
- b. La zona o locación donde se inyectará es bastante amplia en su extensión lateral.
- c. El pozo de inyección penetra el espesor de la formación o zona de inyección, en su totalidad.
- d. El diámetro del pozo es un diferencial comparado con el radio de drenaje del fluido de inyección cuando el tiempo de inyección es mucho más que unos cuantos minutos.
- e. El ingreso de los fluidos dentro de la zona de inyección crea inmediatamente un aumento de presión en la zona a inyectar.

4.2.4.2.3.2 Radio Fijado, de Vulnerabilidad o Establecido

El radio fijado ó establecido de las áreas mencionadas en el punto anterior, no debe ser menos de $\frac{1}{4}$ de milla medido alrededor del pozo de inyección a establecerse.

En la determinación del Radio Fijado, los siguientes factores serán tomados en cuenta:

Química de los fluidos de la formación y los inyectados, la hidrogeología del lugar, poblaciones, uso y dependencia de las aguas subterráneas y las prácticas que se realizaron anteriormente en el área en cuestión.

4.2.4.2.4 ACCIONES DE CONTINGENCIA

Para prevenir el movimiento de fluidos hacia fuentes subterráneas de agua potable; los siguientes factores y criterios se deberían considerar y serán a su vez los factores que una Entidad Fiscalizadora tomará en cuenta:

- Cualidades, características y volúmenes de los fluidos inyectados.
- Cualidades y características de los fluidos in situ (originales dentro de la formación, acuífero o estrato) o de aquellos fluidos que se encuentran en la formación por acciones de inyección anteriores.
- Poblaciones directamente afectadas.
- Geología.
- Hidrogeología
- Historial de las operaciones de inyección.

- Registro de taponamientos y completaciones del pozo de inyección. Esto en detalle significa: Una especie de base de datos de los planes de abandono temporal o definitivo de pozos de agua, petróleo, gas, mediciones, exploratorios, de inyección de residuos y se disponga de registros, descripción de cantidades y tipos de materiales, usados para los taponamientos, el método empleado para realizar el taponamiento, descripción de las formaciones que fueron aisladas, registros gráficos que muestren la locación de la formación aislada, espesores y profundidades de la formación sellada.
- Procesos del Plan de abandono al momento en que el pozo de inyección fue considerado fuera de servicio.
- Conexiones hidráulicas con las fuentes subterráneas de agua potable.

4.2.4.2.5 ASPECTOS NORMATIVOS MECANICOS (Integridad mecánica)

Un pozo de inyección tiene “Integridad Mecánica” si:

- No hay aberturas significativas en las tuberías de revestimiento, tuberías de flujo y packers.
- No hay movimiento significativo de fluidos dentro de una fuente subterránea de agua potable a través de canales adyacentes a las proximidades del pozo de inyección. **(Casing sin ninguna falla).**

Uno de los siguientes métodos debe ser usado para evaluar la no presencia de aberturas significativas en tuberías, casing y packers del pozo de inyección:

- Partiendo de una prueba de presión inicial, monitorear el seguimiento de la presión del espacio anular de una forma continua, hasta determinar un valor representativo, aprobado por la Entidad Fiscalizadora; el cual se mantendrá como el valor de la presión del espacio anular.
- Pruebas de Presión con líquido y gas, o
- Un listado que establezca o muestre el monitoreo de la ausencia de canales significativos por variaciones entre las presiones de inyección y de los caudales inyectados, para los siguientes tipos de pozos de recuperación secundaria ubicados como Clase II:

Pozos existentes que fueron completados sin packer, en los cuales se ha realizado una prueba de presión y que sus datos son confiables y desarrollados a un futuro, para que una prueba de presión sea confiable hasta el momento en que el pozo sea cerrado y que el procesamiento de los datos de la prueba de presión no indique pérdidas de cantidades significativas de petróleo o gas en momentos posteriores; o

Pozos existentes sin una tubería de revestimiento secuencial (casing intermedio), pero con tubería de revestimiento de superficie cuya extensión final sea en la base de las aguas nativas y generen características geológicas e hidrogeológicas

locales permitan la construcción y permitan a futuro que el espacio anular sea visualmente inspeccionado. Para estos pozos, el Experto prescribirá un programa de supervisión que verifique la ausencia de movimiento fluidos significativos de la zona de la inyección a un USDW (fuente subterránea de agua potable).

Uno de los siguientes métodos debe ser usado para determinar la ausencia de movimientos de fluidos significativos referidos anteriormente en esta sección:

- Perfilajes de temperatura y distorsión sónica.
- Solo para pozos Clase II, pruebas de cementación que garanticen la buena compactación del cementante para prevenir posibles migraciones.

La Entidad Fiscalizadora, puede autorizar el uso de algún otro tipo de prueba para demostrar la “integridad mecánica” y que no se refieran a las pruebas mencionadas en los anteriores párrafos de esta sección y que cuente con la aprobación escrita de la compañía operadora. Para obtener la aprobación, la Entidad Fiscalizadora, requerirá de la compañía operadora, una petición escrita en la que se detalle la prueba propuesta y todos los datos técnicos que apoyen su uso como el adecuado. Estas pruebas serán aceptadas si demuestran confiabilidad con respecto a su “Integridad Mecánica” de aquellos pozos destinados a estos propósitos.

Serán requeridos estudios adicionales si la prueba propuesta por la compañía operadora no es totalmente satisfactoria a las autoridades, para que no exista

movimiento de fluidos hacia fuentes subterráneas de agua potable, producto de actividades de inyección en los pozos a usar.

4.2.4.2.6 *PRIORIDAD DE CRITERIOS A CONSIDERAR PARA “CUESTIONAR” LOS PERMISOS DE INYECCION*

Que este demostrado o que se tengan sospechas muy fuertes, de que el pozo a ser usado como inyector, será un contaminante para fuentes subterráneas de agua potable.

Que este demostrado que los fluidos a inyectar en pozos Clase II, sean contaminantes peligrosos.

Que las probabilidades de realizar una contaminación por efectos de la inyección a una fuente subterránea de agua potable; sea bastante alta.

Efectos muy serios de contaminación a poblaciones existentes.

Pozos que al ser usados como inyectores, violen los reglamentos de estado o del gobierno.

La antigüedad y profundidad del pozo inyector, no sean las adecuadas

Vencimiento de información de los datos y permisos de gobierno, si los hubiera.

4.2.4.2.7 *CONSIDERACIONES PARA PROCESOS DE ABANDONO Y SELLADO DE LOS POZOS DE INYECCION*

Los pozos de inyección clase II, requerirán que los sellos sean de cemento, de tal forma que no permitan el desplazamiento de fluidos en o en medio de fuentes subterráneas de agua potable.

La colocación de los sellos de cemento será realizado tomando en cuenta:

El método de balance: Esto es, un tapón de cemento o material similar colocado en forma de mezcla en una locación específica dentro del pozo y que se ha colocado para proporcionar un aislamiento a las presiones que se ejercen. La adecuada ubicación, del volumen de mezcla y su desplazamiento debe ser cuidadosamente calculada y cuantificada. El volumen correcto asegura que la columna de fluidos en la sarta de tubería este balanceada por la columna de fluidos en el anular. Es por esto que se habla de un método de balance.

Uso de herramientas de intervención de pozos, tales como el denominado “Dump Bailer” que viene a ser una herramienta usada para desplazar y colocar volúmenes pequeños de mezcla de cemento en el fondo del pozo.

Método de Dos Tapones: Son típicamente requerimientos regulatorios, asociados a procesos que realmente aseguren que el estrato, o particularmente acuíferos de aguas frescas; sean aislados adecuadamente. En la mayoría de los casos, una serie de tapones de cemento son fijados en el fondo del pozo, con una prueba de la afluencia o de la integridad hecha en cada tapón colocado, para confirmar el aislamiento hidráulico.

Algún otro método alternativo, aprobado por autoridades de gobierno, que sea altamente confiable para la protección de fuentes subterráneas de agua potable.

4.2.4.2.8 CRITERIOS Y STANDARES APLICADOS A POZOS CLASE II

4.2.4.2.8.1 REQUERIMIENTOS DE CONSTRUCCION.

Pozos nuevos de Clase II, serán localizados de tal manera que los fluidos a inyectarse dentro de una formación estén separados de alguna fuente subterránea de agua potable, a través de una zona de confinamiento que no este afectado por fallas abiertas o fracturas de acuerdo a los parámetros fijados en su Área de Revisión.

Todos los pozos de inyección Clase II, serán revestidos y cementados para prevenir movimiento de fluidos en o en medio de fuentes subterráneas de agua potable. Las tuberías de revestimiento y el cemento usados en la construcción de pozos perforados recientemente serán diseñadas tomando en consideración el tiempo de uso que se pronostica a ese pozo. Para la determinación y especificación de las tuberías de revestimiento y el cemento a usar; los siguientes factores se tomarían en cuenta:

Profundidad de la zona de inyección.

Profundidad de la base de la formación que es considerada fuente subterránea de agua potable.

Estimados de las presiones de inyección promedias y máximas.

Adicionalmente, las autoridades gubernamentales, requerirán la siguiente información:

Fluidos de formación

Litología de las zonas de confinamiento y de inyección.

Presiones de carga externas, internas y axiales.

Diámetro del pozo.

Tamaño y grado de la sarta de tubería de revestimiento.

Tipo de cemento a usar.

Los requerimientos mencionados en el punto anterior, no necesariamente se tendrán que cumplir en su totalidad a agotar, en la evaluación de pozos de inyección Clase II, siempre y cuando:

Los pozos hayan sido completados al momento de su perforación y estén en conformidad con aquellos controles exigidos; y

Los Pozos de Inyección no darán lugar al movimiento de líquidos hacia una fuente subterránea de agua potable y crear un riesgo significativo a la salud de las personas.

Otros Registros y Pruebas apropiadas, serán efectuados durante la perforación y construcción de pozos clase II, nuevos. Se ejecutará un reporte descriptivo que interprete los resultados de los registros y pruebas, específicamente; en las zonas de fuentes subterráneas de agua potable y en las zonas de confinamiento de esta fuente. También, se harán reportes de interpretación a la zona de inyección y sus adyacentes. El reporte descriptivo será elaborado por un especialista en interpretación de estos registros. Como mínimo, estos registros y pruebas deberán incluir:

Identificación de ciertas desviaciones en todos los pozos recientemente construidos, inicialmente, mediante la perforación de un pozo piloto y luego ampliándolo en profundidad. Esto permitirá las identificaciones en intervalos consecutivos, para evitar que accesos verticales no sean creados durante la perforación y ellos sirvan de medio al movimiento de los fluidos.

Otros registros y pruebas similares de confiabilidad del área donde se realiza la perforación y que estén disponibles, pueden necesitarse posteriormente; también un plan de construcción y la necesidad de información adicional que pueda incrementar paso a paso la construcción del pozo progresivamente. Ajustar los

registros y las pruebas requeridas a los siguientes requerimientos:

Para tuberías de revestimiento de superficie cuya intención es proteger fuentes subterráneas de agua potable en áreas donde la litología no este bien consolidado:

Registros eléctricos y de calíper antes de la instalación de la tubería de revestimiento, y

Registros de adherencia del cemento, temperatura o densidades después que la tubería de revestimiento es colocada y cementada.

Para Tuberías de Revestimiento Intermedios y Finales que facilitarán la inyección de los fluidos:

Registros eléctricos y de Gamma Ray para determinar porosidades.

Registros de ubicación de fracturas, y

Registros de adherencia del cemento, temperatura o densidades después que la tubería de revestimiento es colocada y cementada.

Con respecto a la formación donde se inyectará, la siguiente información sería evaluada como condiciones mínimas, si se realizarán pozos nuevos de Clase II:

Presiones de los fluidos.

Estimaciones de presiones de fractura

Características físicas y químicas de la zona de inyección

4.2.4.2.8.2 REQUERIMIENTOS PARA PROCESOS DE OPERACIONES, MONITOREO Y REPORTE.

REQUERIMIENTOS PARA OPERACIONES

La Presión de Inyección en la boca del pozo, no debe exceder el valor máximo calculado de modo que la presión ejercida no genere nuevas fracturas o propague las ya existentes en las zonas de confinamiento adyacentes a fuentes subterráneas de agua potable. En ningún caso la presión de inyección debe causar el movimiento de los fluidos inyectados o de formación, hacia fuentes subterráneas de agua potable.

REQUERIMIENTOS PARA MONITOREO

El monitoreo, dentro de lo mínimo requerirá:

Supervisión de las características de los fluidos inyectados dentro de una frecuencia optima que permita generar datos representativos de las características de los fluidos.

Chequeo de la presión de inyección, rate de flujo y volumen acumulado por lo menos con las siguientes frecuencias:

Semanalmente para operaciones de disposición de fluidos producidos.

Mensualmente para operaciones de Recuperación Secundaria.

Cada día durante la inyección de hidrocarburos líquidos y para inyecciones de recuperación de hidrocarburos almacenados.

Un informe de la Integridad Mecánica, al menos una vez cada cinco años durante la vida de uso del pozo inyector.

Conservar los resultados de las supervisiones y/o monitoreos hasta la siguiente revisión de permiso.

Los almacenamientos de hidrocarburos y procesos de recuperación secundaria, pueden ser supervisados en campo o en la base del proyecto, mediante la supervisión del Manifold que reúne a todos los pozos; esto en forma mas amplia que de hacerlo en cada pozo. Sistemas de supervisión separados para cada pozo no son requeridos, siempre y cuando el operador demuestre que la supervisión de un Manifold da resultados tan confiables que supervisarlos individualmente.

REQUERIMIENTOS DE REPORTES

Los requerimientos de reportes, dentro de lo mínimo deben incluir, un reporte anual a la autoridad fiscalizadora que contengan los resultados de las supervisiones listadas en el acápite anterior. Tal reporte incluirá los expedientes mensuales de líquidos inyectados, y cualquier cambio importante en características o fuentes de los fluidos inyectados. La información que previamente autorizada se puede incluido para referencias.

Los operadores de almacenamiento de Hidrocarburos y de proyectos de Recuperación Secundaria pueden dar reportes de campo o de la base del proyecto, de la supervisión del Manifold que reúne a varios pozos de inyección.

4.2.4.2.9 INFORMACION A SER CONSIDERADA POR LA ENTIDAD FISCALIZADORA.

Esta sección dispone la información que debe ser considerada por la Entidad Fiscalizadora para autorizar pozos como de Clase II. Ciertos mapas, secciones transversales, cuadros, gráficos de los pozos, las consideraciones del acápite “Área de Revisión” y otra información a ser incluida, que informen lo necesario de los pozos de inyección y que ellos sean actuales, fácilmente disponibles para la entidad fiscalizadora y además, de que sean fácilmente solicitados y adquiridos.

Antes de la emisión de un permiso para que un pozo pueda operar como de Clase II o se realice la construcción o conversión a un pozo como de Clase II; la entidad fiscalizadora considerará lo siguiente:

Ninguna operadora puede efectuar procesos de inyección al subsuelo, sin antes tener el permiso de la Entidad Fiscalizadora tanto para el uso del pozo como inyector de Clase II así como para la realización de la construcción de un pozo inyector como Clase II.

En caso el pozo se va a convertir a inyector de Clase II se necesitará lo siguiente:

- Un mapa que muestre el pozo de inyección o área del proyecto para lo cual se busca un permiso y los requerimientos del acápite “Área de Revisión”. De acuerdo a los requerimientos mencionados en el acápite “Área de Revisión”, el mapa debe mostrar número, nombres y locación de todos los pozos existentes en producción, pozos inyectores, pozos en abandono, pozos secos (no rentables) y pozos de agua. El mapa también debe mostrar afluentes de agua superficiales, zonas mineras (superficiales y de subsuelo), minas y otras características superficiales incluyendo residencias y caminos y averías definidas o suspendidas.

- Una tabulación de los datos razonablemente disponibles de expedientes públicos o sabidos de otra manera a las peticiones de los pozos dentro del área de la revisión incluido los requerimientos del mapa, solicitados en el párrafo anterior de los pozos que penetran la zona propuesta de inyección o, en el caso de pozos de la clase II que funcionan sobre la presión de la fractura de la formación de inyección, de todos los pozos conocidos que se encuentren dentro del “Área de Revisión” quienes penetran formaciones afectadas directamente por el incremento de la presión de inyección. Tales datos incluirán una descripción de cada uno de los tipos de pozos mencionados, construcción, fecha de perforación, ubicación, profundidad, historial de colocación de tapones y de la completación del pozo, y alguna información adicional que la Entidad Fiscalizadora pueda requerir. En aquellos casos donde la información podría ser repetitivo porque los pozos son de similar edad, tipo y construcción, La entidad Fiscalizadora podrá elegir un requerimiento de datos de grupo de pozos representativos.

- Datos Operativos propuestos:

Volumen y Rate promedio y máximo, de los fluidos a ser inyectados.

Presión de inyección promedio y máxima.

Fuente de procedencia y un análisis apropiado de las características físicas y químicas, de los fluidos de inyección.

- Data geológica apropiada de la zona de inyección y de confinamiento, incluido su descripción litológica, nombres geológicos, espesores y profundidades.
- Nombres geológicos y profundidades de las formaciones donde se encuentren fuentes subterráneas de agua potable, las cuales puedan ser afectados por la inyección.

- Otros esquemas y gráficos apropiados de los detalles de la construcción de los pozos tanto superficiales como del subsuelo.

- Una certificación del pozo candidato que asegure mediante un enlace de funcionamiento y otros medios apropiados, los recursos necesarios para cerrar el pozo mediante tapones o abandono del pozo de acuerdo a los requerimientos establecidos.

La Entidad Fiscalizadora, puede considerar los siguientes puntos, como información complementaria:

- Pruebas de formación planteados que determinan la información para Requerimientos de Construcción de pozos Clase II.
- Programas de estimulación propuestos.
- Procedimientos de Inyección propuestos.
- Planes de Contingencia propuestos, si los hay para hacer frente a las fallas en el pozo de modo de

prevenir migraciones de fluidos contaminantes hacia una fuente subterránea de agua potable.

- Planes para satisfacer los Requerimientos de Supervisión o Monitoreo.

Antes de proceder la aprobación de operación de un pozo de Clase II, la Entidad Fiscalizadora podría considerar la siguiente información:

- Todos los datos de programas de pruebas y registros realizados en el pozo.
- Una demostración de la Integridad Mecánica, conforme a lo mencionado en este punto anteriormente.
- Conocer anticipadamente el Rate de flujo y presión máxima permitidos a la cual operará el pozo inyector.
- Resultados del programa de Pruebas de Formación realizados.
- El actual procedimiento de Inyección; y
- Para pozos nuevos, la jerarquía de acciones correctivas de pozos defectuosos dentro del Área de Revisión.

Antes de conceder la aprobación para el cierre y abandono de pozos Clase II, la Entidad Fiscalizadora considerará la información siguiente:

- Número y tipo de tapones a ser usados.
- La ubicación de cada tapón incluido la elevación del tope y base.
- Cantidad, tipo y grado del cemento usado.

5. CONCLUSIONES

El acuífero elegido para el proceso de Reinyección, debe poseer características geológicas favorables, que asegure el confinamiento de los fluidos inyectados. Además, la formación que contenga a este acuífero debe ser de extensión regional, que en caso tengan afloramientos estos deben ser hacia los extremos.

La formación confinante, debe ser generalmente de rocas sedimentarias que posean ciertas características tales como plasticidad e impermeabilidad. Las lutitas, rocas sedimentarias son de origen arcilloso; presentan éstas características. El porcentaje de lutitas en la formación sello o confinante, debe estar en un porcentaje mayor al 75%.

Las formaciones productivas que contengan a los acuíferos en la mayoría de los casos son formaciones arenosas, es decir rocas tales como las Areniscas, pues ellas poseen la eventualidad de tener dureza (en caso de ser cuarzosa) y de ser permeables.

El acuífero elegido es parte del sistema hidrológico de la cuenca, su principal fuente de recarga es por precipitaciones fluviales.

El análisis de las aguas producidas, reportaran componentes que superen los límites máximos permitidos, el cual se tendrá en cuenta al momento de realizar la calidad del agua a inyectar para evitar incompatibilidad con el acuífero inyector.

Los riesgos de contaminación por efecto de la disposición de las aguas de producción, pueden ser: Una en dirección vertical a través del sello confinante por efecto de filtraciones y la otra es el riesgo de contaminación conforme avance las aguas inyectadas a lo largo del acuífero hasta que lleguen a las zonas de descarga en superficie.

El riesgo de que se originen filtraciones por callamientos verticales originados en la roca sello o confinante, dependerán de que no se supere las presiones de inyección; calculadas con las pruebas de inyectividad.

El riesgo de contaminación a lo largo del acuífero inyector será bastante menor pues conforme el agua inyectada ingrese al acuífero, ellas se desplazarán conjuntamente con las aguas subterráneas propias del acuífero (aguas nativas), a una velocidad tan lenta que su afloramiento a superficie será de miles de años a futuro. A lo largo de este tiempo, el frente del agua cuando aflore a superficie, habrá alcanzado las propiedades químicas de las aguas nativas por efecto de los procesos de dilución.

6. TABLAS

Tabla N° 01: Escala Geológica Detallada de las Eras Geológicas.
(Adaptado de Newman, 1988)

Eras	Períodos	Epocas	Principales eventos biológicos	Millones de años
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Tiempo histórico y prehistórico	1.8 m.a.
		Pleistoceno	Evolución del hombre	
	Terciario	Plioceno	Edad del hielo. Ancestros del hombre-prosimios	6.5 m.a
		Mioceno	Dominio de las angiospermas (aparición de	
		Oligoceno	gramíneas). Radiación de los mamíferos, pájaros	
		Eoceno	e insectos polinizadores	
Paleoceno				
MESOZOICO	Cretácico		Extinción de los dinosaurios y reptiles voladores	145 m.a
			en el continente, extinción de reptiles acuáticos y	
			amonites en el mar.	
	Jurásico		Aparición y radiación de plantas con flores	210 m.a
			Gran desarrollo de ammonites en el mar	
			Expansión de los dinosaurios. Aparición de las aves.	
Triásico		Bosques gigantes de Coníferas, Cycas y Gynkos	250 m.a	
		Aparición de los Dinosaurios y mamíferos.		
		Vegetación dominada por Gimnospermas. Reptiles Mamiferoides		
		Expansión de los insectos		
	Pérmico		Primera catástrofe del ecosistema terrestre con gran extinción	290 m.a

PALEOZOICO			marina terrestre. Extinción de los Trilobites.	
			Diversificación de reptiles primitivos	
	Carbonífero		Primeros reptiles. Anfibios dominantes. Bosques extensos	360 m.a
			Inicio de glaciación en el hemisferio Austral	
	Devónico		Expansión de los bosques primitivos. Primeras plantas con semillas.	408 m.a
			Primeras plantas con semilla. Primeros anfibios e insectos	
			Diversificación de peces con esqueleto interno	
	Silúrico		Diversificación de peces con mandíbula. Primeras plantas terrestres y	438 m.a
			Artrópodos. Diversidad de peces sin mandíbulas.	
	Ordovícico		Gran diversificación de la vida oceánica.	505 m.a
		Trilobites. Primeros vertebrados.		
		Abundantes algas marinas		
Cámbrico		Expansión de los organismos con esqueleto externo.	590 m.a	
		Origen de casi todos los vertebrados.		
		Diversas algas		
PROTEROZOICO	Precámbrico		Primeros organismos multicelulares.	3500 m.a
			Primeras algas verdes-Inicio de la fotosíntesis	
		Procariotas: primeras bacterias		
AZOICO	Consolidación de la tierra		4600 m.a	

Tabla N° 2: TABLA DE EDADES

AÑOS	PERIODO / EPOCA	ERA
543 millones de años	PERIODO CAMBRICO	ERA PALEOZOICA
250 millones de años	PERIODO TRIASICO	ERA MESOZOICA
208 millones de años	PERIODO JURASICO	
146 millones de años	PERIODO CRETACICO	
65 millones de años	PERIODO PALEOCENO	ERA CENOZIOCA
54 millones de años	PERIODO EOCENO	
38 millones de años	PERIODO OLIGOCENO	
24,5 millones de años	PERIODO MIOCENO	
5 millones de años	PERIODO PLIOCENO	
1,6 millones de años	PERIODO PLEISTOCENO	

7. APENDICES

ASPECTOS DE GEOLOGIA

1. MAPAS TOPOGRAFICOS, GEOLOGICOS, ESTRATIGRAFICOS

1.1 GENERALIDADES

Los mapas son representaciones convencionales de la superficie terrestre pues, ninguna parte de nuestra Tierra, por pequeña que sea, puede ser reproducida a tamaño natural, en una hoja de papel. En los mapas se representan, entre otros aspectos, las características del relieve y la existencia de recursos naturales y humanos.

Los cartógrafos son los profesionales encargados de realizar los mapas y son quienes pueden idear una gran variedad de símbolos que se adecuen a las necesidades del mapa que están realizando.

Dentro de las características y elementos que deban poseer los mapas, están:

El Título describe el propósito del mapa y por lo tanto debe estar en un lugar de destaque.

El tamaño va a depender de los propósitos de uso de los mapas.

Uno de los elementos más importantes a tener en cuenta a la hora de consultar un mapa es **la escala**. La escala es la relación entre la distancia de dos puntos que se corresponden con ellos en el mapa. La escala numérica se representa en cifras, como por ejemplo: 1:100.000, lo que indica que una unidad de medida en el mapa (por ejemplo 1 centímetro) representa 100.000 de la misma unidad en la superficie terrestre. Por lo general, se indica la escala de un mapa en el margen y, muchas veces, viene acompañada de una escala gráfica lineal, es decir, un segmento dividido que muestra la longitud sobre el mapa de las unidades terrestres de distancia.

La selección de la escala debe hacerse en función de las informaciones que contendrá el mapa. La escala correcta dependerá de la resolución del dato original, así como del nivel de detalle que el usuario desee incluir en el mapa. La escala debe estar localizada en una posición destacada en el mapa.

Un mapa es más confiable, si el objeto representado está confrontado con el espacio que lo contiene. Es por eso que cada mapa debe tener un **sistema de coordenadas**. Normalmente se utiliza la red de coordenadas geográficas o terrestres, latitud y longitud.

La leyenda es una parte de los mapas en donde se relacionan algunos símbolos a entidades espaciales. Estos símbolos pueden ser indicados visualmente por colores o sombreados, según sean definidos en la leyenda.

Se utilizan diferentes **padrones** para representar diferentes regiones en el mapa. Los padrones pueden estar compuestos por líneas o puntos, o combinaciones de ambos. Si se utilizan padrones de líneas que no varían mucho de espacio y dirección, para la representación de áreas irregulares, entonces; la visualización de los contornos y la comprensión general del mapa se torna difícil. Un mapa representado por un padrón de puntos es mucho más estable y sus contornos son distinguidos más fácilmente.

El color es la variable visual más fuerte, fácilmente perceptible e intensamente selectiva. Es también la más delicada para manipular y la más difícil de utilizar.

Dependiendo del énfasis deseado para un dato, en el mapa, se escoge un determinado color. Algunos colores son más perceptibles que otros. El ojo humano es más sensible al rojo, seguido por el verde, el amarillo, el azul y el púrpura.

El usuario debe consultar los colores más utilizados para representar los datos de su mapa. Ejemplos: carreteras son representadas en rojo, ríos y mares en azul, bosques en verde; en mapas climáticos, las áreas tropicales, en rojo y las regiones de clima seco, en amarillo.

Claridad y fácil lectura son cualidades de un mapa cuya información procurada puede ser fácilmente encontrada, distinguida entre otras y memorizada sin esfuerzo.

Ser legible indica una selección apropiada de líneas, formas y colores así como delimitaciones precisas y correctas. Las líneas deben ser claras, finas y uniformes. Colores, padrones y sombreado deben ser fácilmente distinguibles y correctamente registrados. Las formas de los símbolos utilizados no deben ser confusas.

Se debe intentar separar las manchas y símbolos significativos del tema tratado, de la información de la base cartográfica, evitando que una alta densidad gráfica torne la lectura confusa y complicada, en un mapa mal distribuido.

En la actualidad, se elaboran diversos tipos de mapas, entre ellos, se encuentran los que representan los rasgos del relieve (mapas topográficos), la naturaleza y disposición de las rocas (mapas geológicos), los ríos y lagos (mapas hidrológicos), las características de los suelos (mapas edafológicos), las demarcaciones políticas (mapas políticos), los asentamientos de la población (mapas urbanos), la distribución de las razas (mapas étnicos) o de los idiomas (mapas lingüísticos).

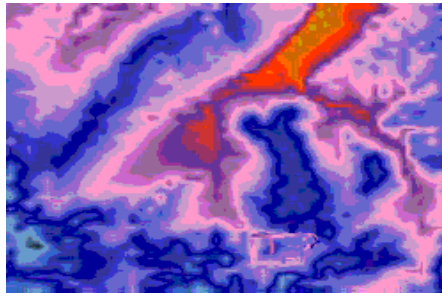
1.2 PROSPECCION GEOFISICA

La introducción de la fotografía aérea en la elaboración de los mapas ha permitido una gran precisión y un gran desarrollo a la producción cartográfica mundial, en la que sobresale la elaboración de cartas especializadas hechas a escalas pequeñas y medianas. Estas constituyen una excelente respuesta a las necesidades de información que en este campo requiere el ser humano.

Este método nos permite poner de manifiesto las diferencias de carácter geoelectrico del subsuelo, y resaltar estructuras. Este sistema se caracteriza por su rapidez de ejecución, su economía y la nula alteración del medio, proporcionando una excelente protección y discreción sobre la zona estudiada, al no poner en evidencia ningún indicio que pueda atraer la atención de personal no autorizado.

Por lo general, estos trabajos de exploración no directa se plantean como fase previa a las labores de exploración de un yacimiento o para ampliar la información de una zona parcialmente estudiada.

La fotografía que mostramos es el resultado de una exploración. Los diferentes colores son diferentes resistencias ofrecidas por los distintos materiales del subsuelo.



1.3 MAPAS TOPOGRAFICOS

Un mapa es la representación del relieve de una área geográfica, que suele ser generalmente de una porción de la Tierra, dibujada o impresa en una superficie plana. En la mayor parte de los casos, un mapa es una representación del terreno en forma de diagrama por lo que suele contener una serie de símbolos aceptados a nivel mundial que representan los diferentes elementos naturales, artificiales o culturales del área que se quiere representar, como por ejemplo; las carreteras, los pueblos y ciudades, las fronteras y límites de países, provincias y municipios, las líneas de ferrocarril, tendidos eléctricos, los ríos, etc.



Para poder leer bien un mapa topográfico hay que tener otra cosa en cuenta. Las variaciones de altitud de las colinas o montañas, al igual que las profundidades de los valles y las gargantas, tal y como aparecen en un mapa topográfico, definen el relieve. Estas representaciones de los desniveles son comúnmente denominadas CURVAS DE NIVEL. Estas curvas vienen a ser unas líneas que resultan de la intersección del terreno con un plano horizontal y nos da información de la altura a que está un punto determinado con respecto al nivel del mar. Todos los puntos que conforman una curva trazada se encuentran a una misma altura. Se emplea en los dibujos para figurar el relieve del terreno e interpretar la forma de la superficie de la tierra, sabiendo si hay montañas, valles, ríos, riscos y demás cualidades del terreno que no se encuentran en un mapa normal.

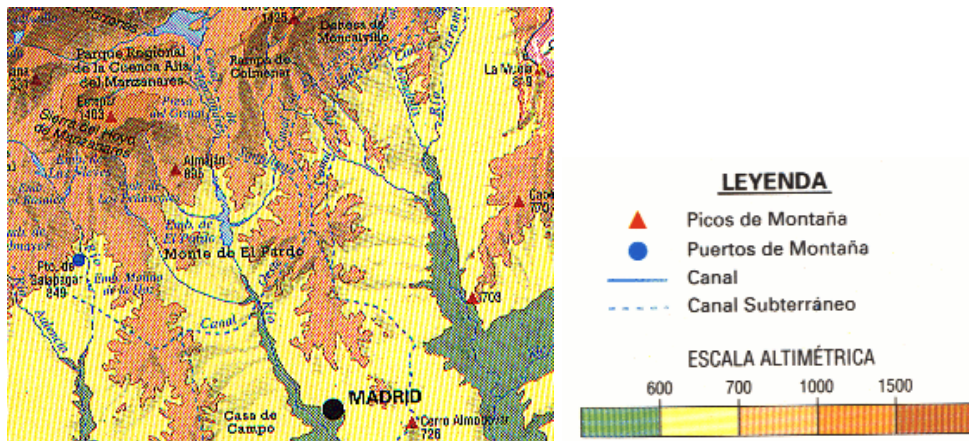
Estas curvas unen los puntos que tienen la misma altitud. El intervalo entre las curvas de nivel que se seleccione debe ser uniforme o equidistante, y se determinará en función del objetivo del mapa, la superficie a cubrir, la disponibilidad de datos y la escala del mapa. Las formas de las curvas de nivel constituyen una representación exacta de las elevaciones y depresiones, ya que muestran las altitudes reales. Cuando las curvas de nivel están muy juntas indican, por ejemplo, la presencia de una pendiente muy abrupta.



Dentro del ámbito tecnológico actual, podemos coger varios paquetes de software muy buenos para manipular mapas en forma digital. Te permiten transferir información entre el GPS y la computadora, bajar y subir waypoints, rutas y tracks, poner símbolos personalizados, comentarios, notas, etc.

1.4 MAPAS FISICOS

Los mapas físicos representan la configuración de la tierra o el mar a través de la representación de los accidentes geográficos de una zona: ríos, valles y montañas.



1.5 MAPAS GEOLOGICOS

Los mapas geológicos representan la forma interior y exterior de un territorio, los diferentes materiales que componen su suelo, los cambios y alteraciones que éstos han experimentado desde su origen y su colocación actual.

Un mapa geológico sirve para mostrar la ubicación y orientación de las principales unidades geológicas y sus características. Esta información ayuda a interpretar la historia geológica de un área, y tiene múltiples aplicaciones prácticas, entre las que se destacan el uso por parte de las compañías mineras y de petróleo, empresas de ingeniería, agencias ambientales, empresas consultoras, entre otras.

Como normalmente no es posible ver todos los detalles de las unidades rocosas, ya que están cubiertas por suelo, agua, vegetación, etc., para elaborar un mapa geológico se recopila información de los afloramientos, en la zona donde las rocas aparecen expuestas en la superficie.

La información relevante que se obtiene de los afloramientos, como por ejemplo el tipo de roca, la orientación de las capas o la presencia de estructuras como fallas o fracturas, se plotea sobre un mapa

topográfico del área. Un mapa geológico, a veces es apoyado por otras fuentes de información como información de pozos perforados.

El comienzo de un mapeo geológico se realiza a partir de un estudio profundo de los antecedentes de la región donde se encuentra la zona que se quiere mapear.

Esta etapa de investigación e información puede realizarse a partir de mapas topográficos, mapas geológicos antiguos, mapas geológicos de gran escala, de revistas geológicas, fotos aéreas, entre otros.



Los mapas geológicos facilitan información precisa sobre:

La **diversidad litológica** de las formaciones geológicas aflorantes o subaflorantes (cubiertas por un suelo de escaso grosor). Su pertenencia a los distintos grupos rocosos permite contextualizar su origen en un determinado ambiente petrogenético. Su composición mineralógica o la textura de sus constituyentes pueden resultar influyentes en la caracterización del medio físico o en los factores desencadenantes de determinados procesos.

La geometría tridimensional de las formaciones y estructuras geológicas. La disposición geométrica y los límites de las rocas aflorantes, así como la orientación de las estructuras que las afectan, son los datos que permiten cuantificar la profundidad y el volumen de las formaciones geológicas y las deformaciones sufridas por los materiales a lo largo de su historia. Los mapas contienen información sobre superficies de estratificación, cambios laterales, discontinuidades, pliegues, fallas, alineaciones de esquistosidad, etc.

La **edad de las rocas y de las estructuras**. La Geología, como ciencia histórica que es, persigue como fin en sí mismo la secuenciación temporal de los elementos sujetos a su estudio. La cartografía geológica permite establecer una ordenación de los materiales y estructuras geológicas basada en el empleo de distintos métodos de datación relativa y absoluta.

Algunas **informaciones específicas**, referidas en su mayor parte a la localización de datos puntuales: actividades extractivas, surgencias, yacimientos paleontológicos, valores de buzamiento o esquistosidad, etc. Para facilitar su comprensión, los mapas geológicos suelen incluir esquemas de columnas estratigráficas de la zona o algunos cortes geológicos representativos.

1.6 FALLAS GEOLOGICAS

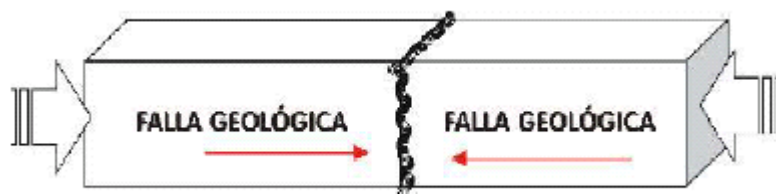
El proceso de formación de las fallas geológicas, implica o va relacionado al entendimiento de las placas tectónicas. Entonces primero empezamos con estos conocimientos.

Es importante conocer a fondo las divisiones de la corteza terrestre que se conocen con el nombre de PLACAS: con espesores que varían entre los 70 y 150 Km. de grosor, cada una con diferentes características físicas y químicas. Estas placas conocidas como Placas tectónicas, se están acomodando en un proceso que lleva millones de años y han ido dando la forma que hoy conocemos a la superficie de nuestro planeta, originando los 5 continentes y los accidentes geográficos en un proceso que está lejos de completarse .

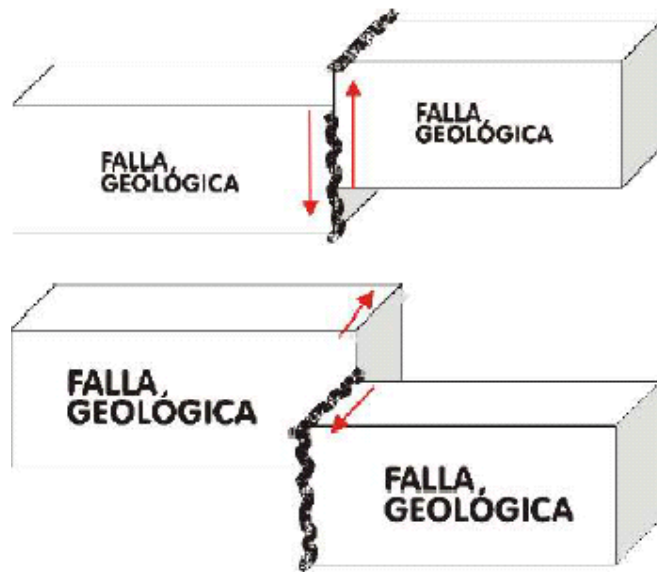
Habitualmente estos movimientos son lentos e imperceptibles, pero en algunos casos estas placas chocan entre sí como gigantes bloques de hielo sobre un océano de magma hirviente presente en las profundidades de la Tierra, impidiendo su desplazamiento.

Entonces una placa comienza a desplazarse sobre la otra originando lentos cambios en la topografía. El choque continuo entre dos placas (como se ve en la lámina) comienza a acumular una energía de tensión que en algún momento se liberará cuando alguna de las dos placas desarrolle más fuerza y se moverá bruscamente contra la otra rompiéndola y liberándose entonces una cantidad variable de energía que origina los movimientos de tierras o también conocidos como terremotos.

Este choque permanente de Placas Tectónicas al fracturar la corteza terrestre origina zonas de menor extensión y profundidad que se mueven en forma independiente, denominadas Fallas geológicas. Estas fallas son entonces rupturas que se hallan a lo largo de la corteza terrestre.



Ejemplo del movimiento de dos fallas:



Muchas de estas fallas se pueden observar a simple vista, , pero otras están ocultas bajo las capas superficiales. Algunas se mueven y son llamadas fallas activas, pero otras no se han movido en varios cientos de años y son consideradas fallas inactivas.

El origen de las fallas se debe a presiones y movimientos de la corteza terrestre 6 causados por la acción de las fuerzas internas del planeta.

ASPECTOS DE HIDROGEOLOGIA

ASPECTOS DE RESERVORIOS

1. PRUEBAS BUILD UP

Medidas y análisis de los valores registrados de la presión de fondo adquiridos después de que el pozo en producción se cierra. El objetivo principal de esta prueba es determinar la Presión Estática del Reservorio sin necesidad de esperar semanas o meses para que la presión en el reservorio integro se estabilice. Presión estática del reservorio es igual en valor a la Presión Inicial del Reservorio cuando el reservorio es inicialmente descubierto, luego; después que la fase de producción comienza esta presión es cercana a la presión promedio del reservorio que es la presión que ejercen los fluidos en movimiento que llegaron y se estabilizaron dentro de una parte del reservorio. Esta presión promedio del reservorio, solo puede ser medida cuando el pozo en producción es cerrado.

Debido a que los Build up test son pruebas que generan una tendencia definida, entonces podemos a través de un análisis determinar otros valores tales como:

- Permeabilidad Efectiva del reservorio.
- Permeabilidad dañada alrededor del pozo.
- Presencia de fallas y algunos grados de distancia a las fallas.
- Alguna interferencia entre pozos cercanos en producción.
- Límites del reservorio donde no hay fuerte empuje de agua o donde el acuífero no es más largo que el reservorio de hidrocarburos.

Las formulas generales usadas en un análisis de datos de presiones Build Up, provienen de una solución de la Ecuación de Difusividad. En análisis de presiones Build Up y Drawdown, las siguientes asunciones son hechas con respecto al comportamiento de flujo y de los fluidos del reservorio:

Reservorio:

Homogéneo.

Isotrópico

Espesor horizontal uniforme

Fluidos:

Una sola fase.

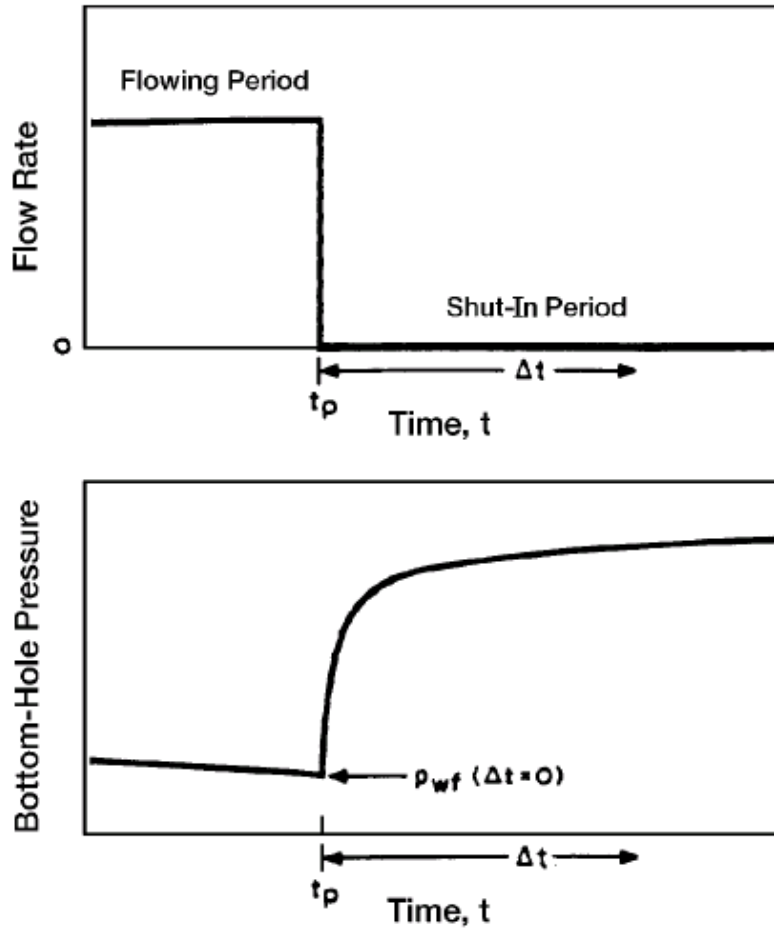
Ligeramente comprensibles

Viscosidad y FVF constantes.

Flujo:

Flujo Laminar

Sin efectos gravitatorios.



2. PRUEBAS FALL-OFF

Cuantificación y análisis de los datos de presión, registrados después de que un pozo de inyección es cerrado. La presión en cabeza (superficie) aumenta durante la inyección, y si el pozo se llena completamente de líquido después del cierre de un inyector; la presión puede ser medida en superficie y la presión en el fondo del pozo pueden ser calculados adicionándole a la presión anterior adicionando la presión de la columna hidrostática. Desde que la mayoría de los pozos inyectores de agua son fracturados durante el proceso de inyección y los pozos de inyección son a menudo al vacío, el nivel de fluido puede caer debajo de la superficie.

3. DESCRIPCION DETALLADA DE UNA PRUEBA DE INYECTIVIDAD Y DE UNA PRUEBA FALL OFF

En las siguientes líneas, asumimos que el pozo piloto (pozo a usar para el propósito), ya fue perforado antes de para comenzar e iniciar el proceso de la prueba. Cuando se va proceder a perforar un pozo nuevo con fines para usarlo como pozo inyector, se debe tomar ciertas consideraciones en el proceso de su perforación. Entre ellas están, tener mucho cuidado al momento de atravesar formaciones con propiedades bastantes diferentes, suficientes rates de flujo para mantener limpias los perforados, pues durante el proceso de la perforación, el lodo crea una capa alrededor de las paredes del pozo que podría obstaculizar seriamente la inyectividad cuando el pozo pase a ser inyector. Asumiendo que las formaciones y/o acuíferos no son bastante permeables, se evitarán realizar los proceso de inyección con fluidos que contengan contaminantes que podrían taponar los estratos. Otras formaciones que sean algo mas permeables, aceptarán diferentes rates de inyección sin que un proceso de fracturamiento sea desarrollado tan prontamente, dependiendo esto también de la profundidad de la formación o estrato. Estos criterios de rates de inyección y propagación de fracturas, serán tomados en cuenta en un programa de perforación de un pozo direccional u horizontal. En estos dos últimos casos la orientación de las fracturas en las formaciones son bastantes complicados.

Para procesos de disposición bajo condiciones normales, las pruebas pueden seguir los siguientes procedimientos:

- Realizar un proceso de “Clean-Up” (Periodo constante de la fase productiva del pozo, generalmente lograda mediante procesos de estimulación, durante este lapso de tiempo los fluidos de tratamiento vuelven de la formación productiva) y mantener en producción el pozo por algún tiempo. Posterior a esto, el aumento de presiones (Build_UP) puede ser usado para estimar la Transmisibilidad inicial de la formación.
- Realizar la prueba de inyectividad a un rate variable por intervalos hasta que el rate de inyección deseado sea alcanzado. En el régimen de flujo en el reservorio, es más fácil controlar las presiones que los rates de flujo. Una vez que el fracturamiento se empieza a efectuar, la presión es poco variable con incrementos de rates y llega a ser más fácil controlar el rate. A menudo, el inicio de la propagación de la fractura no es percibido pero si el incremento de la inyectividad. El agua debe tener la más alta calidad y valores de temperatura adecuados para un proyecto de inyección de agua de producción.
- Descender el rate de flujo para determinar la presión límite que va ha ocasionar un fracturamiento.
- Inyectar por dos o tres días para establecer una condición de flujo continuo (claro que esto va ha depender mucho de la permeabilidad del reservorio). Cerrar el pozo internamente y observar los resultados de presiones Fall-Off para determinar si se habría ocasionado un fracturamiento.
- Realizar una evaluación de los datos aportados por un “Spinner” (Un objeto para medir in situ la velocidad del flujo de fluidos en un pozo inyector o productor basado en la cuantificación de la velocidad que experimenta un objeto tipo carrete) conjuntamente con un evaluador de temperatura bajo condiciones de estado continuo, y así de esta manera generar un perfil de inyectividad.

- Como una prueba referencial, podríamos continuar inyectando bajo condiciones de fracturamiento durante dos a seis semanas para determinar la tendencia del fracturamiento.
- Varias pruebas Fall-Off pueden ser realizados durante este periodo para determinar los cambios en la longitud de la fractura y posiblemente los cambios de esfuerzos horizontales de la roca reservorio con el tiempo.

Las presiones Fall-Off pueden ser analizadas para determinar las dimensiones del fracturamiento propagado o inducido.

Si la Transmisividad de la formación se incrementa significativamente en comparación con los datos obtenidos de una prueba Fall-Off, la fractura muy probablemente se ha ampliado hacia otra zona permeable.

Si dentro de las mediciones hechas in situ, de los esfuerzos; se encuentra la posibilidad de que se podría generar un posible fracturamiento hacia la zona superior o hacia la zona inferior del estrato inyector, una alternativa de monitorear este suceso debe ser tomado en cuenta. Los posibles métodos para esto serían:

- Registros de temperaturas de alta resolución.
- Registros Gamma-ray
- Pruebas de impedancia hidráulica
- Supervisión acústica (microsísmica)

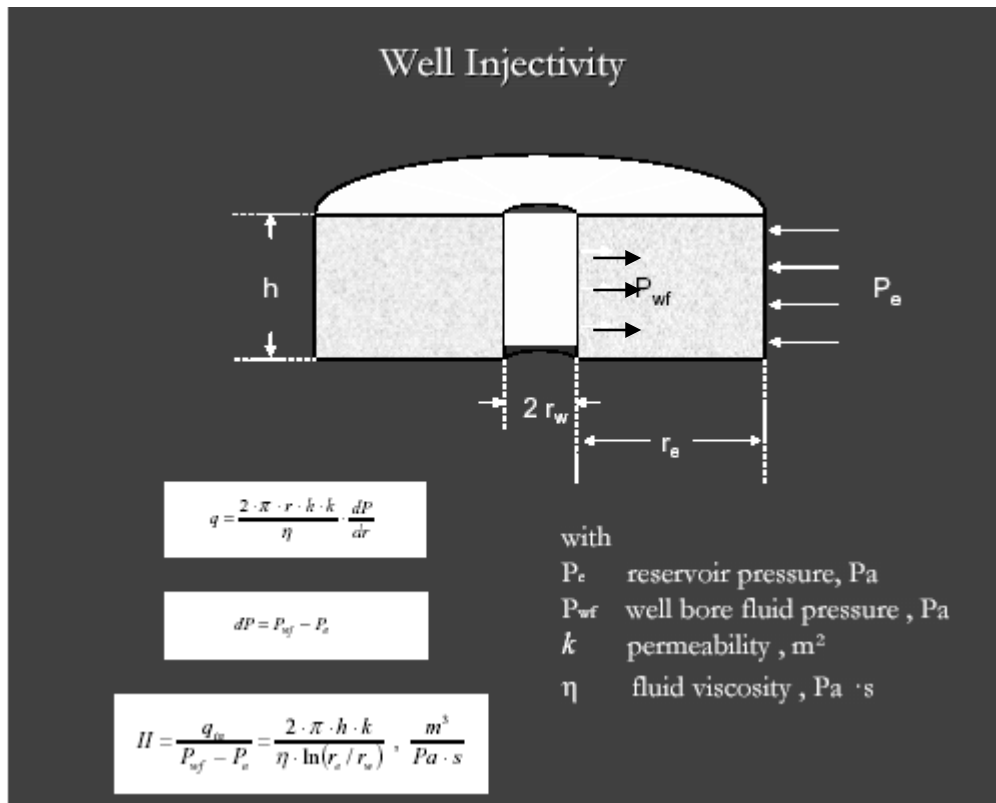
Estos registros deben ser realizados y repetidos a intervalos regulares durante la realización de las pruebas de que trata este acápite.

Una causa probable del incremento de la presión en la parte anular durante una prueba, puede deberse a una fuga por los packers o a cambios de temperaturas.

Una Prueba de Impedancia Hidráulica puede ser usada para estimar directamente la dimensión de la fractura. Esta técnica implica generando un pulso por medio de una presión instantánea en la cabeza del pozo (bombeando un volumen de aprox. Un litro). La reflexión de este pulso de presión desde el fondo del pozo muestra primero que todo, la presencia de fracturas abiertas. Por otra parte, las características de la reflexión puede ser usado para estimar el tamaño de la fractura. El último uso es solamente factible para las completaciones del pozo, puesto que las reflexiones se pueden alterar ampliamente a través del cambio de diámetros en las tuberías. En cualquier caso la técnica rinde una medida exacta de la presión límite de propagación de fractura, lo cual es un importante punto en la interpretación de una prueba de presión Fall-Off. En inyectoras de agua, cambio en las presiones y temperaturas del reservorio pueden ampliamente

influenciar a los esfuerzos internos y ello es muy importante para adicionar información e interpretar las pruebas Fall-off.

Las ventajas de monitorear el crecimiento de las fracturas verticales y las dimensiones de las fracturas son dos cosas útiles. Primero, ello puede ser posible para finalizar la prueba antes de que una comunicación no deseada con otras formaciones sea establecida y segundo la presión de inyección máxima puede ser definida para que esas comunicaciones mencionadas no ocurran.



BIBLIOGRAFIA

HIDROGEOLOGIA CONCEPTOS BASICOS

<http://www.fortunecity.com/campus/chemistry/195/hidro/hidro.htm>

OIL INDUSTRY GLOSSARY

<http://www.lloydminsterheavyoil.com/glossary.htm>

OIL INDUSTRY GLOSSARY II

<http://www.eandp.demon.nl/glossary/PRODUC~1.HTM>

SCHLUMBERGER GLOSSARY

<http://www.glossary.oilfield.slb.com>

APUNTES DE GEOLOGIA GENERAL

<http://plata.uda.cl/minas/apuntes/geologia/geologiageneral/geogenap.html>

GEOMORFOLOGIA Y LITOLOGIA

<http://club.telepolis.com/geografo/geomorfologia/litologia.html>

MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

<http://www.geocities.com/manualgeo/>

GLOSARIO DE ASP. GEOLOGICOS

http://www.gsyc.inf.uc3m.es/arce/glosario/glosararce_g.htm#G

GLOSARIO GEOLOGICO EN INGLES

http://www.icog.es/portal/glosario/eng_resultado.asp

INJECTIVITY

http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb52/projects/Vulkanite/Vortraege/0604_Kolloquium_Rummel.pdf

E.P.A_ INJECTION CONTROL PROGRAM

<http://www.setonresourcecenter.com/40CFR/Docs/wcd00000/wcd00073.asp>

PLUVIOMETROS

http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/salljex/archive/manuals/manual_medicion_pluviometros.

SUSTANCIAS QUÍMICAS _ propiedades

<http://144.16.93.203/energy/HC270799/HDL/ENV/envsp/Vol323a.htm#>

E.P.A.

<http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?sid=000a72cb3975a131467acf5ce53bea64&c=ecfr&tpl=%2Findex.tpl>

ENGLISH DICTIONARY

<http://dictionary.reference.com>

<http://thesaurus.reference.com>

GUIDELINES FOR PRODUCED WATER INJECTION

<http://www.ogp.org.uk/pubs/302.pdf>

AGUA PRODUCIDA Y PROBLEMAS ASOCIADOS

http://www.pttc.org/pwm/pw_stoc.htm

CARACTERÍSTICAS DE UN MAPA CUALESQUIERA

http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/introcar.htm#ele_carta

<http://usuarios.lycos.es/kinei/mapas.htm>

http://www.codelcoeduca.cl/tecnico_profesional/asistencia_geologica/modulos/reconocimiento/estructura/confeccion.html

GEOLOGÍA Y PETROLOGÍA

<http://www.monografias.com/trabajos/geologia/geologia.shtml>

http://www.iespana.es/natureduca/geol_petrograf_rocasexog2.htm

GEOGRAFÍA FÍSICA

http://www.iespana.es/natureduca/geog_fisica_climat4.htm

PERFILES ELÉCTRICOS

<http://energia.mecon.ar/contenidos/contenidos.asp?id=837>

IMPORTANCIA DE LOS MAPAS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

<http://www.cienciasnaturals.com/pdfs/RogelioLinares1.pdf>

DATOS SOBRE GEOMORFOLOGÍA

<http://www.minem.gob.pe/camisea/estudios/comerciato/geomorfologia.pdf>

GEOMORFOLOGÍA

<http://www.solociencia.com/geologia/geomorfologia.htm>

GEOLOGIA

http://www.fagro.edu.uy/geologia/web/Taller2/t2_gcp03.html