

## PRINCIPALES TIPOS DE LODOS EMPLEADOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS DE GAS, ACEITE O AGUA\*

Miguel Angel SIERRA\*\* y Germán de Jesús SALAZAR\*\*

### RESUMEN

Se presentan aquí componentes básicos de un lodo de perforación y los principales tipos de lodos utilizados hoy en la industria petrolera y en la perforación de pozos de agua.

### ABSTRACT

The basic chemical compounds and mineral components of a drilling mud, and the more important muds used today in the oil and gas industry are presented. As well as those utilized in drilling of water wells.

### INTRODUCCIÓN

Según API(1985), un fluido de perforación es aquel empleado en la perforación rotatoria para desempeñar funciones específicas durante dicha operación. El término fluido incluye a líquidos, gases o mezclas de estos (ver figura). Mientras aquellos donde priman los gases – denominados fluidos neumáticos (aire, gas natural y/o espuma, principalmente, hacen parte de ellos) – se emplean sólo en casos especiales, donde predominan los líquidos – llamados *lodos* – son de uso muy extendido en las operaciones de perforación y reacondicionamiento de pozos de hidrocarburos o agua.

### ALGUNOS DE LOS COMPONENTES DE UN LODO DE PERFORACIÓN

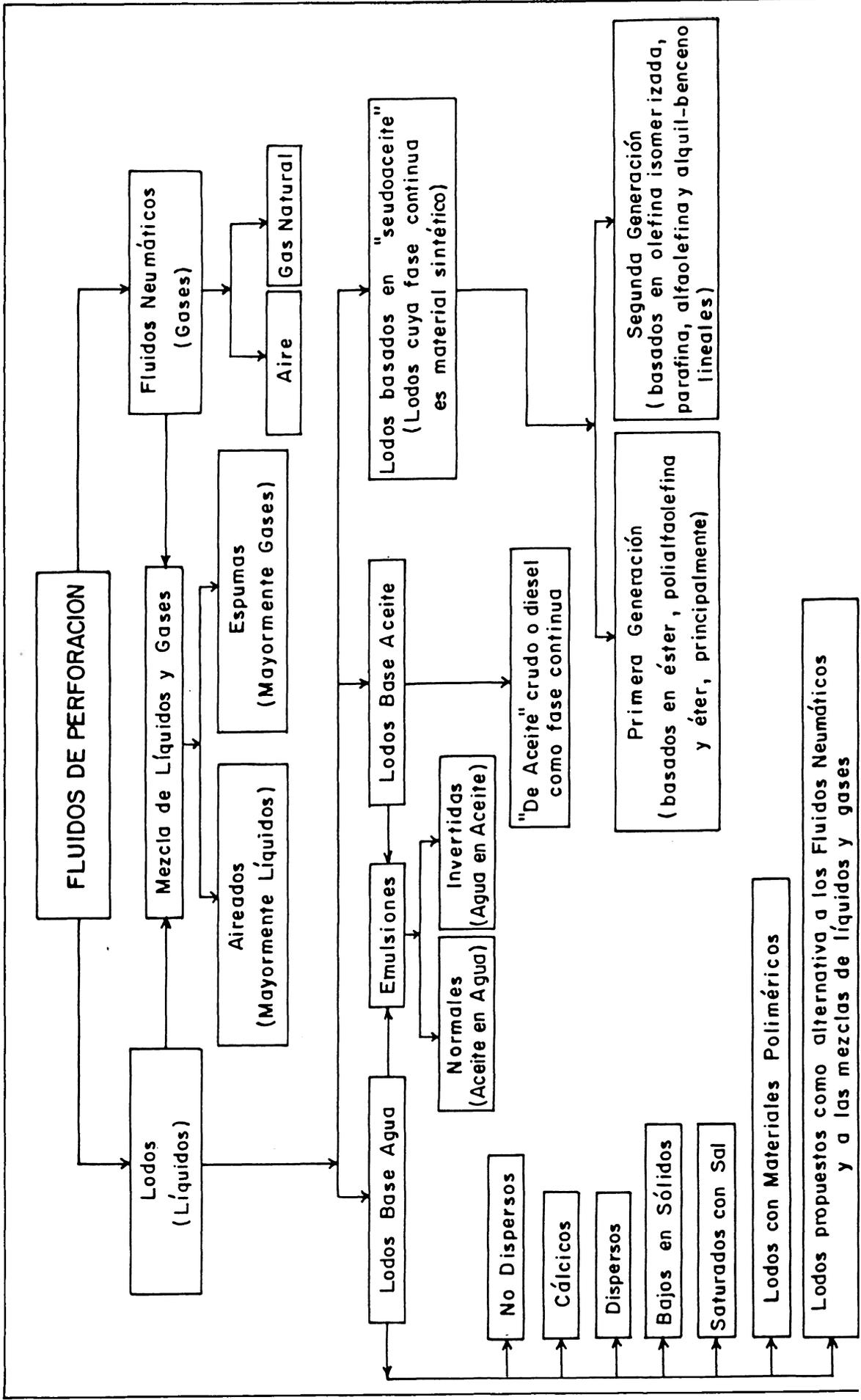
Los lodos de perforación comúnmente presentan como líquido base el agua, el aceite (petróleo crudo o uno de sus derivados) o una mezcla estable de ellos. Para complementar las propiedades de este líquido base y ajustar las características del lodo de modo que responda a las exigencias de una operación específica, se utilizan materiales diversos, denominados *aditivos*.

Algunos aditivos actúan principalmente sobre la densidad del lodo, aumentándola (se les llama densificantes o "pesantes"); otros, llamados viscosificantes, actúan sobre la viscosidad y el gel, aumentando la capacidad del lodo para transportar y suspender los recortes de perforación. Los aditivos llamados dispersantes o adelgazantes hacen los lodos

---

\* Este artículo es uno de los productos de la investigación "Uso de materiales poliméricos, producidos o comercializados en Colombia, en la perforación de pozos de gas o aceite" (Sierra y Salazar, 1996) desarrollada con el auspicio del Comité para la Investigación y el Desarrollo Científico en la Universidad Nacional de Colombia (CINDEC), capítulo de Medellín.

\*\* Profesor, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. A.A. 1027, Medellín



"más fluidos". los "taponantes" deben evitar las pérdidas de grandes volúmenes de lodo (pérdidas de circulación) hacia las formaciones perforadas; los controladores de filtrado intentan hacer mínimos los volúmenes (principalmente de componente líquido) de lodo que pasan hacia dichas formaciones. Las sustancias empleadas para aumentar el pH de los lodos (soda o sosa cáustica -NaOH- y potasa cáustica -KOH-, preferentemente) también están entre los aditivos, así como aquellos reactivos (extendedores de bentonita, ampliadores de resistencia a la temperatura, emulsificantes, bactericidas, antiespumígenos, por ejemplo) cuya función primordial es la de mejorar el rendimiento o el desempeño de otros de los materiales empleados en la conformación del lodo. Cabe anotar que un mismo aditivo puede afectar varias propiedades de un lodo. Veamos los principales aditivos, agrupados según su función principal.

### Densificantes

En ellos es muy importante su gravedad específica (entre más alta, menos masa de densificante es requerida), su dureza (entre más alta, mayor es la posibilidad de contribuir al rayado y corrosión de los conductos atravesados por el lodo) y su disponibilidad en la naturaleza. Algunos son

- Barita (sulfato de Sr, Pb o Ba). El sulfato de Bario, denominado Baritina, es el más utilizado en los lodos de perforación: su gravedad específica y su dureza, según Betejtin (1997), están, respectivamente, entre 4.3-4.5 y entre 3-3.5.
- Galena (sulfuro de plomo). Gravedad específica y dureza varían (Op.cit., p.202), respectivamente, entre 7.4-7.6 y entre 2-3. Es muy importante para la obtención de plomo pero actualmente es raramente usado como densificante, debido a su alta toxicidad.
- Carbonato de Calcio (como Aragonito o Calcita, según su forma de cristalizar en la naturaleza). Para el Aragonito, la gravedad específica y dureza varían (Op.cit., p.399), respectivamente, entre 2.9-3.0 y entre 3.5-4. La Calcita presenta (Op.cit., p.394) gravedad específica entre 2.6 y 2.8 y una dureza de 3; es mucho más abundante en la naturaleza que el Aragonito.
- Hematita (Óxido de hierro). Puede encontrarse en la naturaleza asociada en grandes masas a la Barita. Su gravedad específica y dureza varían (Op.cit., p.307), respectivamente, entre 5.5-5.2 y 5.5-6. Su tendencia a incrementar las pérdidas de filtrado y el grosor de la costra han reducido grandemente su uso en lodos.
- Ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ). Las grandes aglomeraciones de este mineral son usualmente utilizadas para obtener Titanio, materia prima muy apreciada en la industria aeronáutica. Su gravedad específica es 4.72 y su dureza varía (Op.cit., p.310) entre 5 y 6. Especialmente debido a la gran dureza, su uso como densificante de lodos se ha visto limitado a casos en los cuales la velocidad de flujo, dentro de las tuberías y demás conductos de perforación, es baja, de modo que el efecto abrasivo del densificante se mitiga. Igual cosa puede decirse de la Hematita.

- Sales disueltas. Especialmente cloruros de sodio y de calcio; empleados sobre todo en la perforación de estratos de sal.

### **Viscosificantes**

Las arcillas han sido tradicionalmente los viscosificantes más usados en lodos de perforación. Entre ellos sobresalen la bentonita -rica en montmorillonita, que presenta gran capacidad de intercambio catiónico (80-150 miliequivalente./100 g, según Lambe y Whitman, citados por Escobar y Saavedra -1989-), capacidad que, según estos últimos autores (investigadores del ICP), es altamente responsable de la enorme facilidad de hidratación de la bentonita en agua dulce- y la atapulgita (silicato hidro magnésico-alumínico), usada para dar viscosidad a lodos con agua salada, en donde no es efectiva la bentonita (salvo que se haya prehidratado en agua dulce). La atapulgita se hidrata -y proporciona viscosidad- en agua salada pues se vale de un efecto de unión de sus partículas, que presentan estructura acicular. Su capacidad de intercambio catiónico es muy baja.

Especialmente en los años 90, el papel viscosificante de las arcillas ha sido completado, y en algunos casos reemplazado, por los polímeros. Muy usados para éste y otros efectos son el XC, el CMC, el HEC, todos degradables por el efecto de temperatura (unos 250°F). El almidón, polímero natural y tradicionalmente muy utilizado, presenta como principal inconveniente su vulnerabilidad ante el ataque bacteriano.

### **Adelgazantes**

Su objetivo primordial es el de disminuir la viscosidad del lodo. Entre ellos sobresalen por su uso amplio los fosfatos -Pirofosfato ácido de sodio (SAPP), Hexametáfosfato de sodio (SHMP) y el fosfato tetrasódico (TSPP), por ejemplo-, los tanatos (extractos de quebrachos y de abeto, por ejemplo), los lignitos (ácidos húmicos y demás lignitos modificados con compuestos básicos, por ejemplo) y los lignosulfonatos (de sodio, calcio, etcétera). Los fosfatos se degradan térmicamente a unos 150°F, los tanatos y lignosulfonatos soportan temperaturas hasta de unos 250°F. Los lignitos son estables hasta por encima de los 400°F, situación que los hace recomendables para control de las propiedades en lodos con lignosulfonatos sometidos a temperaturas altas.

### **Taponantes**

Entre los más usados hasta hoy están mica, aserrín, papel, semillas de algodón (la cáscara) - todos para pérdidas de circulación en perforaciones poco profundas-, materiales fibrosos, recortes de celofán, cáscaras de nuez, tierras diatomáceas y mezclas de los cuatro últimos. Los materiales fibrosos, recortes de celofán o mezclas que los contengan no son recomendables para ser usados con lodos base aceite.

**Controladores de pérdidas de filtrado** (parte del lodo que se filtra, hacia las formaciones perforadas, a través de la costra, torta, revoque o enjarre).

Impropiaamente (pues el filtrado no sólo está constituido por agua) también se les denomina reductores o controladores de pérdida de agua. La bentonita, los polímeros y los adelgazantes (excepto los fosfatos y los taninos) vistos anteriormente se han usado con éxito como controladores de pérdidas de filtrado.

## Otros reactivos

También pueden ser parte de un lodo de perforación aditivos que funcionan como lubricantes, emulsificantes, antiespumantes, floculantes, inhibidores de corrosión, entre otros.

Las concentraciones recomendadas de todos los reactivos empleados en un lodo de perforación (que debe responder a unas necesidades específicas) se pueden consultar en los manuales de las compañías productoras y/o comercializadoras de tales reactivos. Algunos ejemplos de composiciones de lodo se pueden leer en la sección siguiente.

## PRINCIPALES LODOS DE PERFORACIÓN

Después de iniciar su trabajo, muy difícilmente se encuentran dos lodos iguales, debido a la incorporación de recortes provenientes de las formaciones diferentes en las que se utilizan. No obstante se pueden establecer clasificaciones amplias de los lodos de perforación, según su composición inicial, tales como la que nos presenta Kelly(1983), en la cual se hace énfasis en las concentraciones de los aditivos recomendados y en las características esperadas de cada tipo de lodo. La clasificación de Kelly sigue las descripciones aprobadas por la IADC y la API para fluidos de perforación, completamiento y reacondicionamiento (Ver la Revista World Oil, que aparece en "Bibliografía"). Además de los complementos que la IADC hace a la clasificación contemplada por Kelly, este aparte considera, al finalizar, algunos de los lodos de perforación más modernos.

### Lodos no dispersos

Son aquellos que no contienen adelgazantes. Entre ellos se encuentran los sistemas utilizados para perforar pozos poco profundos (o los primeros metros de pozos profundos) tales como los lodos primarios y los naturales (conformados por agua y arcillas aportadas por las formaciones perforadas). Algunos autores consideran como lodos no dispersos a los poco tratados con aditivos químicos.

Los *lodos primarios* (también llamados iniciales por ser comúnmente utilizados para comenzar las perforaciones) pueden ser considerados como paradigma de los sistemas no dispersos.

Usualmente se presta atención escasa a la formulación inicial de los lodos primarios y ello puede conducir a grandes costos posteriores. Lo más importante de dicha formulación es incluir reactivos que suministren una buena capacidad para transportar recortes. Sólo en algunos casos el control de las pérdidas de filtrado de estos lodos también será fundamental.

En la mayoría de casos, el lodo primario puede estar compuesto de agua dulce, bentonita y cal apagada (hidróxido de calcio). Primero se hidrata la bentonita y luego se agrega la cal que aumenta el valor real del punto de cedencia y, por tanto, la capacidad de transportar recortes, a bajas ratas de cizalladura. Con la expresión "valor real del punto de cedencia" nos referimos al obtenido en un reograma, curva de consistencia o curva de flujo (rata de

cizalladura contra esfuerzo de cizalladura) del lodo. Las cantidades requeridas de bentonita y cal dependen del punto de cedencia deseado. Por ejemplo, en muchos pozos se puede usar entre 15 y 25 lbm/bbl de la primera y entre 0.1 y 1 lbm/bbl, de la segunda, pero si el lodo primario se requiere para perforar una grava gruesa podrían necesitarse puntos de cedencia más altos y por tanto se emplearía más bentonita y más cal.

Para control de pérdidas de filtrado en lodos primarios se recomienda agregar, a la mezcla bentonita hidratada-cal, un polímero no iónico tal como el almidón o el XC que respeten el punto de cedencia logrado con la cal. Su concentración común varía entre 0.5 y 0.75 lbm/bbl. El CMC no se recomienda para dicho control pues reogramas de lodos primarios (bentonita hidratada-cal y este polímero iónico) muestran que actúa como adelgazante, eliminando el punto de cedencia (con la consiguiente disminución en la capacidad de transporte de recortes) cuando el lodo está sometido a tasas de cizalladura bajas (las comunes en el flujo anular). Además, a tasas de cizalladura altas (las comunes en la tubería de perforación y en las boquillas de la broca) el CMC hace que la viscosidad efectiva del lodo aumente, elevando la resistencia friccional y requiriendo mayores presiones de bombeo -para tasas de flujos equivalentes- que las necesitadas por un lodo al cual se le controlan pérdidas con un polímero no iónico.

### **Lodos cálcicos**

Son altamente tratados con compuestos de calcio, catión divalente que inhibe el hinchamiento de arcillas de las formaciones perforadas. Por esto son muy utilizados en operaciones de perforación para controlar "shales" fácilmente desmoronables, evitar ensanchamiento del pozo y prevenir el daño de formaciones potencialmente productoras.

Normalmente se obtienen por adición (a lodos constituidos con bentonita y agua) de cal apagada (a los así logrados se les llama sistemas de cal o lodos calados) o yeso (sistemas de yeso o lodos de yeso), de tal forma que la arcilla sódica (bentonita) se convierta en arcilla cálcica. Terminada la conversión se agrega un exceso de cal o de yeso para asegurar dicho proceso. Los sistemas de cal usualmente presentan concentraciones en exceso de ella: de 1 a 2 lbm/bbl (lodos bajos en cal) o de 5 a 15 lbm/bbl (lodos altos en cal).

Por su lado, los sistemas de yeso pueden presentar concentraciones en exceso de 2 a 4 lbm/bbl.

Ambos sistemas requieren comúnmente de otros aditivos (adelgazantes, polímeros, sosa cáustica, etcétera) para controlar las propiedades de cada lodo.

### **Lodos dispersos**

Cuando se perfora a grandes profundidades o en formaciones altamente problemáticas, pueden ser muy útiles estos lodos que presentan como característica principal la dispersión de las arcillas constitutivas (lo que adelgaza el lodo), lograda usualmente con lignosulfonatos. Éstos u otros aditivos similares reducen las pérdidas de filtrado del lodo, a la vez que lo adelgazan. Otros materiales tales como lignitos solubles y aditivos químicos especializados también son usados en los lodos dispersos, para controlar las propiedades requeridas en una perforación específica.

## Lodos con lignosulfonatos

En general se considera este lodo como fluido de perforación para todo propósito y prácticamente su desempeño se ajusta a esa descripción. Sin embargo, es de especial importancia en la perforación donde (1) se requieren lodos de densidad alta (más de 14 lbm/gal); (2) se pueden encontrar temperaturas relativamente altas (250 a 300°F); (3) se desea una tolerancia alta a los sólidos; (4) se requiere una pérdida de filtrado baja (generalmente menos de 10 ml API); (5) es necesaria la tolerancia a la sal común, anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) o yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); y (6) se desea resistencia a contaminación con cemento.

La composición básica del lodo incluye agua dulce o agua de mar, bentonita, lignosulfonatos de ferrocromo o de cromo (y tal vez ahora los lignosulfonatos libres de cromo), soda cáustica, CMC o almidón estabilizado y, con frecuencia, un preservativo. Los materiales opcionales incluyen lignito, aceite, lubricantes, surfactantes, etcétera.

Los siguientes factores son importantes cuando se considera el uso de lodo con lignosulfonato

- El carácter adelgazante del lignosulfonato se degrada térmicamente de 230 a 250 °F. Se puede estabilizar temporalmente tal carácter con adiciones de 0.1 a 0.2 lbm/bbl de cromato o bicromato de sodio
- El carácter de reductor de filtrado del lignosulfonato se degrada a 350 °F. Los lodos con lignosulfonato tratados intensamente pueden parecer estables térmicamente a temperaturas mayores de 350°F, sin embargo, gran parte de esa llamada estabilidad es simplemente una indicación de que hay tanto lignosulfonato presente en el lodo que debe ocurrir una degradación considerable antes de poder ver los efectos.
- La viscosidad de los lodos con lignosulfonato se reduce considerablemente con el aumento de temperatura. Pruebas de laboratorio y de campo han mostrado que tal reducción excesiva de viscosidad lleva a asentamiento de los densificantes y a una capacidad muy pobre para transportar recortes. Debido a dicha reducción, un programa hidráulico diseñado para mantener el flujo laminar en el anular puede fracasar porque el flujo en el fondo del hoyo llega a ser turbulento y se presentan problemas de erosión en el pozo.
- Los lodos con lignosulfonato no son efectivos para estabilizar la mayoría de "shales". Observaciones realizadas en una celda de alta temperatura y alta presión indican que estos lodos desestabilizan "shales" que contienen arcillas de montmorillonita e incluso "shales" con presencia de arcillas illíticas, cloríticas y caoliniticas. Ésto se ha verificado muchas veces en operaciones de campo.
- El filtrado de los lodos con lignosulfonato puede ser responsable de daños de formación (reducción de la permeabilidad) altamente significativos en formaciones potencialmente productoras. La valiosa propiedad del lignosulfonato en el fluido de perforación -su capacidad para deflocular y dispersar arcillas- se convierte en un factor perjudicial a medida que el filtrado invade zonas potencialmente productoras que contienen arcillas.

La dispersión y desalojamiento de partículas de arcillas en las zonas permeables permiten que las arcillas se desplacen y finalmente taponen los poros -tal vez con un efecto parecido al de una válvula de cheque-. Las permeabilidades se pueden reducir tan seriamente por esta acción que intervalos potencialmente productores pueden inicialmente pasarse por alto o, después de probar para mirar el potencial de productividad, dejarlos abandonados.

- Los lodos con lignosulfonato que se han usado para perforar cemento o que han sido tratados con cal apagada pueden sufrir cementación por alta temperatura, al combinarse los iones de calcio y los hidroxilos de la cal apagada.. Tal situación se ha experimentado en varios pozos.
- Los lodos con lignosulfonato pueden no ser bien representados por el modelo reológico Bingham. Por ello, para estimar mejor sus puntos de cedencia, es aconsejable establecer bien las curvas de consistencia correspondientes.

### **Lodos bajos en sólidos**

Son aquellos cuya cantidad y tipo de sólidos son estrictamente controlados pues, de no hacerlo, las propiedades fundamentales de estos lodos -y por ende las funciones específicas que deben cumplir- pueden verse rápida y seriamente afectadas. Estos lodos no deben presentar porcentajes (en volumen) de sólidos totales por encima de 10, la relación de sólidos perforados a bentonita debe ser menor que 2:1, y la cantidad de sólidos arcillosos también debe ser controlada.

La principal ventaja de estos sistemas es que mejoran significativamente la rata de perforación en las formaciones para las cuales son recomendados.

### **Lodos con cloruro de potasio y polímeros**

Los primeros esfuerzos para usar cloruro de potasio en lodos, como inhibidor de reacción ante "shales", resultaron ser un fracaso ya que no había aditivos para pérdida de filtrado y viscosificadores que funcionaran bien en un medio potásico. En años recientes, han aparecido productos nuevos que hacen práctico el uso de lodos con cloruro de potasio en muchas áreas de difícil perforación. La concentración de cloruro de potasio usada depende del tipo de formación a perforar: los lodos con concentraciones bajas (5 a 7 % en peso del agua utilizada para preparar el lodo) se usan en formaciones de "shales" firmes, o de "shales" inestables que contengan muy poca esmectita, y en arenas potencialmente ricas en hidrocarburos y que puedan sufrir daños en su permeabilidad al ponerse en contacto con agua dulce. Los lodos con concentraciones altas (10 a 20 % en peso del agua) se utilizan para perforar "shales" tipo "gumbo" -que se hacen pegajosos y pierden su porosidad al ponerse en contacto con agua dulce-, para arcillolitas y lodolitas que sean dispersadas fácilmente por lodos base agua dulce y para perforar "shales" ricos en esmectita; estas últimas formaciones se desmoronan por contacto con el agua dulce.

La composición básica de estos lodos es por lo general una combinación de varios de los siguientes materiales: agua dulce o agua de mar, cloruro de potasio, un polímero para inhibición (generalmente proliacrilamida), un polímero generador de viscosidad (con frecuencia del tipo XC), bentonita prehidratada, almidón estabilizado o CMC, potasa

cáustica o soda caustica y otros aditivos tales como lubricantes. Los siguientes son algunos factores importantes a considerar cuando se contempla el uso de lodos con cloruro de potasio

- En general presentan baja tolerancia a los sólidos y por consiguiente tienen que ser altamente procesados (control mecánico de sólidos, por ejemplo) o ser diluidos y descartados cuando se usan para perforar "shales" problemáticos. Estas exigencias hacen de este lodo uno de los más onerosos.
- Por la presencia necesaria de polímeros para controlar las pérdidas de filtrado, la estabilidad térmica de estos lodos limita su uso a 250°F como máximo
- Estos lodos presentan un comportamiento plástico de Bingham, con puntos de cedencia altos y buenas viscosidades a tasas de cizalladura bajas. Su capacidad de limpieza del pozo es grande. Sus buenas propiedades reológicas facilitan su tratamiento en zarandas mecánicas para "shales" o en desarenadores y deslimadores tipo ciclón.
- Las observaciones visuales, en laboratorio, que usan una celda de alta temperatura y alta presión, indican que el lodo con cloruro de potasio es el lodo de base agua más efectivo para estabilizar "shales" problemáticos
- El uso de CMC para controlar la pérdida de filtrado produce una disminución del punto de cedencia real y de las fuerzas gel. Consecuentemente, la viscosidad del lodo a tasa de cizalladura baja (la que se presenta en el anular) será más baja y reducirá la capacidad de limpieza del hoyo
- Cuando se perforan "shales" con capacidad de intercambio catiónico alta (como la presentada por la mayoría de "shales" tipo "gumbo"), el consumo de cloruro de potasio es muy elevado. Desafortunadamente la velocidad de consumo también es alta, y, por ende, es probable que sea difícil mantener la concentración deseada del ión de potasio (responsable de la estabilización de las formaciones perforadas). Si el valor de la concentración cae demasiado bajo, se reduce la efectividad del lodo para estabilizar los "shales". Algunos ensayos sin éxito con este lodo se pueden atribuir casi exclusivamente a la incapacidad de agregar, con velocidad suficiente, cloruro de potasio. Por consiguiente es muy importante elaborar un plan que tenga en cuenta esta situación cuando se vaya a usar lodo con cloruro de potasio.

### **Lodos saturados con sal**

Este es el nombre común para un lodo de perforación en el que la fase de agua está saturada (mínimo 189000 ppm) con cloruro de sodio. En general se usan estos lodos donde hay que perforar secciones con sal, o domos de sal, o "shales" problemáticos u otro tipo de formaciones que se afecten por la presencia de agua dulce.

La composición básica de estos lodos es agua dulce, agua de mar o salmuera, sal común, bentonita (por lo general prehidratada) o atapulgita, más CMC o almidón. Otros materiales opcionales son soda cáustica, lignosulfonato, cal apagada, lubricantes, etcétera.

Los siguientes son factores que se deben considerar cuando se piense en el uso de lodos saturados con sal

- Aunque el lodo saturado con sal tiene alta capacidad de tolerancia a los sólidos, se hace casi inmanejable cuando se permite que el contenido de sólidos de gravedad específica baja se vuelva alto. Por supuesto, el significado de "alto" depende de la densidad del lodo - entre más alta sea, más baja la cantidad de sólidos de baja gravedad que pueden ser tolerados -. Así, para que un lodo saturado con sal y de densidad 11.1 lbm/gal cumpla bien sus funciones debe presentar -como máximo- 9% en volumen (aproximadamente 75lbm/bbl) de sólidos de baja gravedad específica.
- La estabilidad térmica del lodo está limitada básicamente por la temperatura de degradación de su componente menos estable.
- Después de los lodos base aceite y de los preparados con cloruro de potasio (sin contar los preparados con materiales poliméricos), los saturados con sal son de los mejores para perforar "shales" problemáticos. No obstante, muchas veces se opta por no usar los lodos saturados con sal por dos razones:
  - Requieren cantidades mayores -con respecto a los otros lodos- de materiales para controlar sus pérdidas de filtrado. Ello se debe a que son sistemas inhibidos (presentan aditivos que impiden o limitan su reacción con las formaciones perforadas) altamente, con grandes cantidades de sal común.
  - La dificultad para controlar sus propiedades reológicas, problema que acompaña a una mayor facilidad de dispersión en el lodo de los recortes de formación, situación debida, principalmente, a la caída de la concentración de sal por debajo del punto de saturación o al aumento -por encima de los niveles máximos- de la presencia de los sólidos de baja gravedad específica, así el agua permanezca saturada de sal. Aquí debe destacarse nuevamente la importancia de un control de recortes de formación y de sólidos en general: Si éstos se mantienen en concentraciones bajas en los lodos saturados con sal no habría problemas con sus propiedades reológicas. Finalmente puede decirse que si, a pesar de estar las concentraciones de sólidos dentro de los límites apropiados, un lodo saturado con sal alcanza fuerzas gel muy altas, esta situación puede remediarse con la adición de lignosulfonatos y soda cáustica: pH de 10.5 y lignosulfonatos en concentración de 4 lbm/bbl corresponden a tratamientos típicos de adelgazamiento.
- Estos lodos se han utilizado, con supersaturación de sal, para perforar exitosamente en áreas donde la presencia de sales plásticas en las formaciones han llegado a colapsar las tuberías de revestimiento.

### **Lodos cuya fase continua es aceite**

Abarcan dos tipos principales de sistemas: 1) lodos de aceite. Mezclas de aceite diesel, asfaltos oxidados, ácidos orgánicos y otros aditivos. Su contenido de agua debe estar por debajo del 5%. También se pueden constituir con crudo, previamente desgasificado, como fase continua. 2) lodos de emulsión invertida (agua en aceite). En ellos las concentraciones de agua, emulsificantes (usualmente ácidos grasos y derivados de amina),

jabones de alto peso molecular, viscosificantes (generalmente bentonita) y otros aditivos varían para poder mantener la estabilidad eléctrica y las propiedades reológicas de un lodo con requerimientos específicos. La concentración de agua, en todo caso, no debe superar el 50%.

En general estos lodos se han empleado con éxito para muchas tareas en perforación: pozos profundos, condiciones extremas de presión y temperatura, problemas de pega de tubería y de estabilidad del pozo, necesidad de atravesar zonas que contienen sales, yeso o anhidrita, presencia de sulfuro de hidrógeno u otras sustancias corrosivas para brocas y tubería, hallazgo de formaciones potencialmente productoras y que pueden ser dañadas por otros tipo de lodos, gran necesidad de minimizar la fricción y los torques (caso de los pozos altamente direccionales), etcétera. Quizás sea su carácter contaminante la mayor restricción para emplearlos y hoy difícilmente puede recomendarse un lodo de aceite. Las emulsiones invertidas, especialmente si su fase continua está constituida por aceites minerales de baja toxicidad (muy baja viscosidad y prácticamente sin compuestos aromáticos), aún se usan, sobre todo por la "perforabilidad" (traducida en menos problemas técnicos durante toda la perforación. En otras palabras, menor tiempo total de perforación y menores costos).

### **Lodos con materiales poliméricos**

Son aquellos, base agua dulce o salada, que tienen incorporados compuestos químicos de cadena larga y peso molecular alto (polímeros naturales, semisintéticos o sintéticos), compuestos que pueden contribuir (1) al control de pérdidas de filtrado y de propiedades reológicas, (2) a la estabilidad térmica, (3) a la resistencia ante contaminantes, (4) a la protección de las zonas potencialmente productoras, (5) a mantener la estabilidad de las formaciones atravesadas, (6) a dar lubricidad a la sarta, a reducir el torque al cual se ve sometida, a prevenir sus pegas y a protegerla en ambientes corrosivos, (7) a mejorar la perforabilidad, (8) a mantener un ambiente limpio, etcétera.

Entre los materiales poliméricos más usados en las operaciones de perforación están el almidón, las gomas de "Guar", "Xanthan" y de algarrobo, la carboximetil-celulosa, el lignito, la celulosa polianiónica, los poliacrilatos, el copolímero de vinil amida/vinil sulfonato, la poliacrilamida parcialmente hidrolizada, los ácidos poliaminados, la metilglucosida, etcétera.

Estos lodos se han constituido, desde finales de los años 80, en una de las mejores alternativas ante los problemas ambientales causados por el uso de los lodos cuya fase continua es aceite.

Las desventajas relativas más prominentes de los lodos con materiales poliméricos parecen ser el costo alto y su "perforabilidad" (en ella son superados por los lodos cuya fase continua es aceite y por aquellos cuya fase continua es "material sintético").

### **Lodos cuya fase continua es "material sintético (producido por síntesis química)"**

Según definiciones de la EPA, citadas por Churan, Candler y Freeman(1997), estos lodos presentan agua (como fase dispersa) en materiales producidos por la reacción de ciertos compuestos purificados químicamente. Al provenir de estos compuestos purificados, los materiales sintéticos estarían libres de hidrocarburos aromáticos, cosa que no ocurre con las

fases continuas tradicionales -el gasóleo (aceite diesel) y los aceites minerales de baja toxicidad-, derivadas de aceite crudo mediante procesos de separación física y/o reacciones químicas.

Esta nueva clase de lodos - se les denomina "lodos basados en pseudoaceite" (Friedheim, 1997) - posee la mayoría de propiedades de los lodos base aceite -recordemos que éstos presentan estabilidad ante temperaturas altas, inhibición ante "shales" u otras formaciones sensibles al agua dulce, protección excelente de la sarta ante elementos corrosivos, pérdidas de filtrado muy bajas, resistencia a contaminantes tales como sales, anhídrita y yeso, ratas de perforación altas, lubricación muy buena de la sarta, etcétera- y con su uso se podrían disminuir los grandes problemas de contaminación causados con los lodos cuya fase continua es aceite, pero muchos de ellos presentan toxicidad acuática (op.cit p.728). Aún así, algunos autores recomiendan estos nuevos lodos como una alternativa al uso de lodos cuya fase continua es aceite.

Otras desventajas de los lodos cuya fase continua es "material sintético" son el costo (varios cientos de dólares norteamericanos por barril; situación que llevaría a costos inimaginables las perforaciones en las cuales se presenten pérdidas de circulación) y la poca estabilidad que pueden presentar (Growcock y Frederick, 1996, p.132) las emulsiones respectivas al ser sometidas a temperaturas altas.

Entre los materiales sintéticos más empleados se encuentran (Op. cit.):

- Ester. Logrado de la reacción de un alcohol con ácido graso y aceites vegetales; es más estable y puro que los ésteres naturales y fue el primer material sintético empleado para preparar lodos de perforación.
- Eter. Obtenido mediante la condensación y oxidación parcial de alcoholes. Se han sintetizado monoéter y biéter ( más biodegradable que el primero).
- Poli-alfa-olefina. Hidrocarburo parafinico u olefinico, ramificado, obtenido de la polimerización de etileno; se asemeja a los aceites minerales de toxicidad baja pero no contiene compuestos aromáticos, nafténicos ni tiofénicos.
- Alquil-benceno lineal. Químicamente similar al tolueno pero con una cadena alquílica larga, en vez de un grupo metilo, unido al anillo bencénico. Puede ser considerado como un híbrido entre el gasóleo (diesel) y los aceites minerales de toxicidad baja.
- Alfa-olefina lineal. Hidrocarburo de cadena recta, obtenido mediante la polimerización de etileno, similar a la versión olefinica de la poli-alfa-olefina pero sin ramificaciones y que presenta el enlace doble al final de la molécula.

#### **Últimos lodos propuestos como alternativa a los fluidos neumáticos (Medley, 1997)**

En momentos en los cuales las técnicas de perforación "por debajo del balance de presión" ("underbalance") tienen gran repunte en los Estados Unidos de América (más del 12% de los pozos allí perforados durante 1997 se planearon con este método) se ha propuesto un nuevo sistema de lodos que han sido probados en el campo con éxito y que se constituyen en una buena alternativa al uso de fluidos neumáticos pues con ellos (1) se puede disponer

de un lodo de muy baja densidad e incompresible (2), se eliminan los grandes compresores requeridos por los fluidos neumáticos, y (3) se pueden utilizar herramientas MWD. Como con los fluidos neumáticos, con estos nuevos lodos se pueden lograr ratas de perforación altas y disminuir los daños de formación y las pérdidas de circulación.

La reducción de densidad en lodos convencionales se logra agregando (en concentraciones de más del 20%, en volumen) esferas de vidrio huecas (gravedad específica de 0.37, diámetro promedio de 50 micrómetros y 3000 lpc de resistencia al colapso), desarrolladas con el auspicio del Departamento de Energía de los Estados Unidos. Los lodos así preparados podrían ser reciclables.

## NOMECLATURA

A.A.	: Apartado Aéreo
AIME	: The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.
API	: American Petroleum Institute
Ba	: Bario
Bbl	: Barriles
CINDEC	: Comité para la investigación y el Desarrollo Científico de la Universidad Nacional de Colombia
CMC	: Carboximetilcelulosa
EPA	: U.S. Environmental Protection Agency
Fe	: Hierro
°F	: Grados Fahrenheit
Gal	: Galones
HEC	: Hidroxietilcelulosa
IADC	: International Association of Drilling Contractors
ICP	: Instituto Colombiano del Petróleo
JPT	: Journal of Petroleum Technology
K	: Potasio
Lbm	: Libras – masa
Lpc	: Libra-fuerza/pulgada cuadrada
MWD	: Measurement-While-Drilling
Na	: Sodio
Op.cit.	: Obra citada
p.	: Página
Pb	: Plomo
pH	: Potencial de Hidrógeno
Pp	: Páginas
Ppm	: Partes por millón
SAPP	: Pirofosfato Ácido de Sodio
SPEDC	: SPE Drilling and Completion
SHMP	: Hexametáfosfato de Sodio
SPE	: Society of Petroleum Engineers of AIME
Sr	: Estroncio
Ti	: Titanio
TSPF	: Fosfato Tetrasódico
U.S.	: United States of America
UIS	: Universidad Industrial de Santander
XC	: Xanthomas Campestris, productor de la goma "Xanthan" o polímero XC

## BIBLIOGRAFIA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Glossary of drilling-fluid and associated terms. API Production Department, Dallas Texas, 1985, 23 pp.

BETEJTIN, A. Curso de mineralogía. Editorial MIR, Moscú, 1977, 739 pp.

CHURAN, M., CANDLER, J.E., and FREEMAN, M. On - site and off-site monitoring of Synthetic - based drilling fluids for oil contamination. SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference. Dallas, Texas, 3-5 March 1997.

ESCOBAR, C. y SAAVEDRA, F. Sensibilidad y estabilización de arcillas. Reventón, Edición especial - Memorias de la segunda semana técnica de Ingeniería de Petróleos, UIS, Bucaramanga, Agosto 14 - 18 de 1989. p. 39.

FRIEDHEIM, J.E. Second - generation synthetic drilling fluids. JPT, julio de 1997, pp. 724-725.

GROWCOCK, F. and FREDERICK, T. Operational limits of synthetic drilling fluids. SPEDC, September 1996, pp 132-136.

KELLY, J. Jr. Drilling fluids selection, performance, and quality control. JPT. Mayo 1983, pp. 889 - 898

MEDLEY, G. H. ET AL. Field application of lightweight, hollow - glass - sphere drilling fluid. JPT, November 1997, pp. 1209 - 1211.

SIERRA, M.A. y SALAZAR, G. Propuesta para un proyecto de investigación sobre Uso de materiales poliméricos, producidos o comercializados en Colombia, en la perforación de pozos de gas o aceite. Universidad Nacional de Colombia, sede de Medellín, 1996. 25 pp.

WORLD OIL. World Oil's 1997 guide to drilling, completion and workover fluids. World Oil, junio, 1997, pp. 75-116.