

Formulación de un sistema gelificante base sábila (*Aloe barbadensis*) para el aislamiento de arenas de agua, en pozos productores

Rubén Vega, Fabiola Mottola, Julio Colivet, Crismary Castillo

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
Departamento de Ingeniería de Petróleo
rvegas@udo.edu.ve

Resumen: La cementación tiene como objetivo principal aislar y proteger la zona productora de hidrocarburo para evitar la contaminación con agua o gas, en la industria petrolera, son diversas las causas que originan la producción de agua y para resolver este inconveniente se utilizan entre otros métodos los sistemas gelificantes. Es por ello, que se planteó evaluar el comportamiento de un sistema gelificante a base de sábila (*Aloe barbadensis*), desarrollado a partir de sus características físicas, comparándose con un sistema de comercial, mediante pruebas de laboratorio. Durante el desarrollo de la investigación, se demostró que la estructura polimérica de ambos sistemas, estando constituido el sistema gelificante comercial por un disacárido, mientras que los geles propuestos están constituidos por un polisacárido, siendo el segundo más fuerte en cuanto a su estructura. Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios, los sistemas gelificantes a base de sábila presentaron una consistencia no móvil moderadamente deformable, estando por encima del sistema gelificante comercial, el cual mostró una consistencia no móvil altamente deformable. Asimismo, al ser sometidos a agentes contaminantes aún presentaron un comportamiento aceptable como para ser empleado a nivel de campo.

Palabras claves: Cementación, Revestidor, Entrecruzante, Polisacárido, Mucílagos

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de pozos en la industria petrolera está comprendida por la planificación y ejecución de procesos operacionales, que se desarrollan por etapas, representando la perforación de hoyos una de las más complejas y riesgosas en donde se incluye la cementación de revestidores. La cementación tiene como objetivo evitar la producción de fluidos indeseables, mantener la integridad del pozo además del aislamiento y abandono de zonas, por lo que es de vital importancia que se realice adecuadamente atendiendo aspectos técnicos y operacionales previamente establecidos [1]. Hoy en día, las compañías petroleras producen un promedio de tres barriles de agua por cada barril de petróleo en yacimientos agotados, se gastan más de 40000 millones de dólares por año para hacer frente a los problemas de agua indeseada. En muchos casos, las tecnologías innovadoras para el control de agua pueden significar una reducción de los costos y un aumento en la producción de hidrocarburos [2].

La excesiva producción de agua es un problema común encontrado en pozos productores de petróleo y puede ser causada por fuga en los revestidores, comunicación por detrás del revestidor, flujo preferencial a través de zonas de alta permeabilidad en el yacimiento, adedamiento o conificación [2]. De acuerdo a lo descrito, las fallas durante la cementación pueden conllevar a la comunicación de zonas de agua con zonas de hidrocarburos, provocando una producción con alto corte de agua, disminuyendo la rentabilidad y vida productiva de los pozos. Asimismo, los acuíferos trae como consecuencia la disminución de la producción de petróleo, daños por deposición de sólidos, problemas operacionales, incremento de los costos operacionales, y problemas ambientales. Durante mucho tiempo la industria petrolera ha creado sistemas que ayudan a los pozos perforados a controlar los cortes de agua, provenientes de acuíferos cercanos o por algún método de recuperación que se le haya aplicado al yacimiento y de esta forma, mejorar la tasa de producción de hidrocarburo [3].

Dentro de los métodos actualmente empleados para reducir la producción de agua en yacimientos petroleros se tienen los métodos mecánicos y los métodos químicos entre los que destaca la utilización de polímeros entrecruzados o reticulados o sistemas gelificantes, esto con el fin de impedir la irrupción de agua y así lograr mejorar la calidad de la cementación primaria, evitando problemas de poca adherencia del cemento, que pudiesen producir problemas de agua debido a fugas por detrás del revestidor [4]. Dichos sistemas usualmente están formados por polímeros solubles en agua, que al reaccionar con agentes entrecruzantes forman una red tridimensional, con agua en su interior. El tratamiento consiste en inyectar la mezcla de polímero y entrecruzante antes de que ocurra la reacción, de tal forma que cuando esta mezcla llegue a la zona deseada comience a formarse el gel. [5].

Existen geles poliméricos sintéticos y naturales como el gel de sábila. Él es el producto principal que se desea extraer de las hojas de la planta de Aloe Vera; este se encuentra en la zona interior, protegida por una gruesa y robusta piel [6]. Envuelto por el mucílago, contiene de 0,3 - 4% de sólidos totales consistentes de aproximadamente 75 compuestos, y 96 - 99,7 % de agua [7]. El gel está constituido, en su mayor parte por polisacáridos mucilaginosos, que suelen contener diferentes proporciones de manosa, glucosa y galactosa [8]. Los polisacáridos son compuestos que consisten en un gran número de monosacáridos (moléculas de azúcares simples) enlazados glucosídicamente. En las plantas pueden presentarse diversos tipos de polisacáridos, como la celulosa, el almidón, las pectinas, las gomas, los mucílago y las hemicelulosas. Dentro de estos, las hemicelulosas constituyen el segundo compuesto más abundante en la naturaleza, después de la celulosa, y junto con ésta constituyen las paredes celulares de los vegetales [9].

Venezuela actualmente tienen cultivos de sábila en los estados Falcón y Lara contemplando cerca del 95% de la producción nacional, con unas 2300 hectáreas sembradas que producen unas 138.000 ton/años de gel dirigido principalmente a satisfacer el mercado internacional, no obstante se podría sembrar en casi el 38% del territorio nacional [10].

La sábila o Aloe vera tiene amplios usos en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética; así mismo, la parte que más se usa de esta planta es el gel, debido a sus propiedades funcionales, antioxidantes y terapéuticas [11]. No obstante, no existen

antecedentes del uso de gel para evitar producción de agua en pozo de petróleo, pero, de acuerdo a su características de ser un gel polimérico natural se decidió formular a nivel de laboratorio un sistema gelificante a base de sábila (*Aloe barbadensis*) capaz de controlar las tasas de producción de agua, tomando en cuenta que la base de este sistema está constituido por polímeros naturales biodegradables, que en el caso de permanecer en la formación posiblemente no ocasionaría contaminación o daños a las zonas productoras.

2. METODOLOGÍA

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de perforación de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. De la sábila (*Aloe barbadensis*), mediante un proceso de centrifugado se obtuvieron cuatro componentes: Mucílago, Cristal, Fase sólida y Fase líquida. A cada uno de estos geles se les realizó una prueba de viscosidad a diferentes temperaturas (80 ° F, 120 ° F, 150 ° F y 180 ° F), para reflejar la degradación de los geles naturales con respecto a la adición de calor. La selección de la temperatura estuvo basada en la hoja de calidad de un producto de la empresa Halliburton, dicho producto se caracteriza por ser un sellador que proporciona adecuados tiempos de bombeo para inyección de pozos a temperatura (Bhit) en intervalos de 120 ° a 180 ° F [12]. Posteriormente, se empleó la prueba de Friedman que corresponde a un análisis de varianza para el caso de medida ordinal, en el cual los grupos están relacionados entre sí., con la finalidad de conocer si existían diferencias significativas en el comportamiento de los geles debido a variación de la temperatura.

Considerando que los sistemas gelificantes deben ser limpios, sin sólidos en suspensión, se aplicó la norma venezolana COVENIN (Comisión venezolana de normas industriales), 1343-78 para Frutas, Vegetales y Productos Derivados [13], a los geles de sábila de cristal, fase líquida, fase sólida, este procedimiento permitió seleccionar la base del sistema a emplear posteriormente

Para la formulación de los geles se prepararon dos soluciones, la primera contuvo el polímero hidratado (geles en estudio) en agua más silicato y la segunda solución compuesta por una salmuera que representó el agente entrecruzante. La mezcla de las dos soluciones constituyó el sistema. Preparadas las muestras de cada uno de los sistemas se vaciaron en envases de vidrio y se les colocó una canica a cada uno, se llevaron a baño de María a la temperatura establecida (180 °F), para así determinar la consistencia de los geles a través de la prueba de la botella, la cual es una técnica económica y directa que se utilizan para obtener la siguiente información: a) Una medida cualitativa de la fuerza de gel y de la formación de precipitados; b) Una medida semi-cuantitativa de la velocidad de gelificación c) Una manera conveniente para evaluar la estabilidad en el tiempo de los geles a una temperatura de prueba determinada[14].

La consistencia de un gel (Tabla 1) se puede observar mediante una escala cualitativa propuesta por PDVSA –INTEVEP [14].

Tabla 1. Escala cualitativa de la consistencia de los geles

Letra	Consistencia
A	Sin cambio a la vista (sin gel)
B	Solución viscosa
C	Gel muy suave altamente móvil
D	Gel muy suave móvil
E	Gel muy suave moderadamente móvil
F	Gel suave móvil
G	Gel suave moderadamente móvil
H	Gel suave poco móvil
I	Gel no móvil altamente deformable
J	Gel no móvil moderadamente deformable
K	Gel no móvil poco deformable
L	Gel rígido
F	Gel suave móvil

Posteriormente se determinaron los tiempos iniciales y finales del proceso de gelificación los cuales se compararon con un sistema gelificante comercial denominado en el estudio como IJ. Finalmente se procedió a contaminar los sistemas gelificantes base sábila seleccionados con menor cantidad de sólidos, con un agente espaciador, un fluido de perforación base agua lignosulfonato y agua sintética de formación (todos juntos). Las características del espaciador se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Formulación del espaciador empleado.

Fase acuosa (ml)	Goma Xántica (gr)	Oxido de Magnesio (gr)	Biocida (gotas)	CaCO ₃ (gr)
340	2	0,45	2	52,5

3. RESULTADOS

A las cuatro muestras: Mucílago, Cristal, Fase sólida y Fase líquida, se les midió la viscosidad, las mismas mostraron un comportamiento similar, al ser sometidas a la aplicación de calor. No obstante, se observó que los geles Mucilago, Fase líquida y Cristal se degradaron con mayor facilidad que la Fase sólida que a su vez permaneció de manera más estable. El comportamiento de la viscosidad de los geles en estudio se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Viscosidad de los geles en estudio vs temperaturas.

Temperatura (°F)	Viscosidad (cPs)			
	Mucílago	Cristal	Fase sólida	Fase líquida

80	21	16	12	11
120	13	14	12	9
150	11	11	11	9
180	9	11	10	7

El Mucilago fue un gel limpio sin sólidos, pero se degradó con facilidad ocasionando un cambio en los valores de la viscosidad de manera considerable. El Cristal presentó sólidos en suspensión, al someterlo a cambios de temperatura se degradó hasta llegar a mantenerse estable, su viscosidad no siguió disminuyendo quizás por los sólidos en suspensión que contiene el mismo. Con respecto a la fase sólida está compuesto por sólidos en su mayoría, fue un gel que presentó más estabilidad, esto ocurrió quizás por la fricción que hay entre las partículas sólidas y la poca fase líquida que aún se encuentra en el gel, manteniendo así una viscosidad plástica casi constante. Finalmente la Fase líquida presentó pocos sólidos en suspensión y al ser sometida gradualmente a temperaturas más elevadas se degradó con facilidad. Cabe destacar que todos los fluidos exhiben un cambio en la viscosidad al aumentar la temperatura, esta conducta en mayor o menor grado depende tanto de la temperatura como de la presión [15].

En el comportamiento gráfico de la viscosidad de los geles (Figuras 1, 2, 3 y 4) se evidencia que todas las muestras en estudio se ajustaron a una ecuación exponencial, cuyos factores de correlación (R^2) oscilaron desde 0,835 para la fase sólida hasta 0,966 del gel Mucilago. Considerándose estos valores obtenidos como correlaciones positivas fuertes [16].

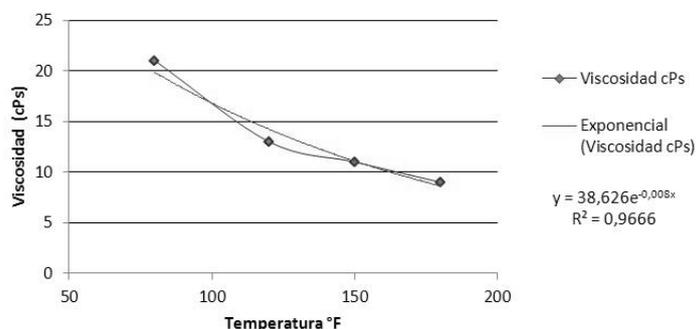


Fig.1. Gel Mucilago viscosidad vs temperatura.

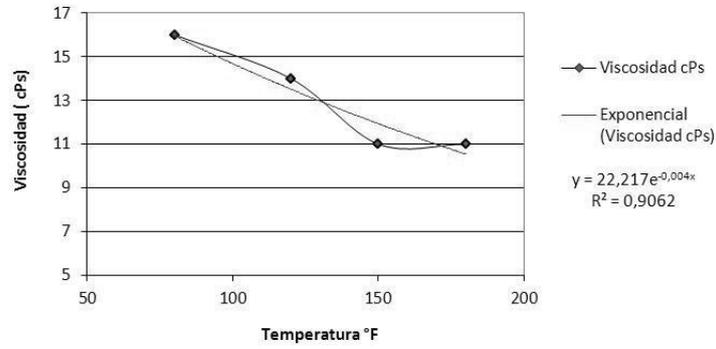


Fig. 2. Gel Cristal Viscosidad vs temperatura.

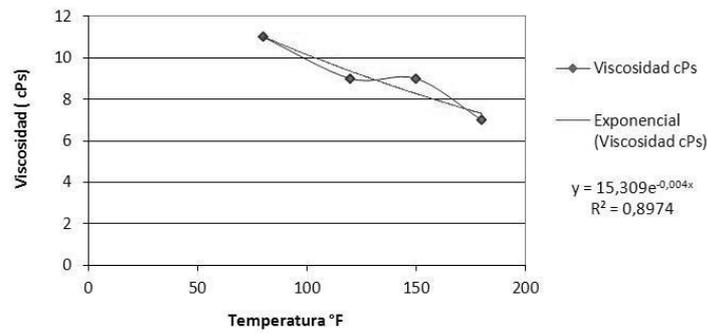


Fig. 3. Gel fase líquida Viscosidad vs temperatura.

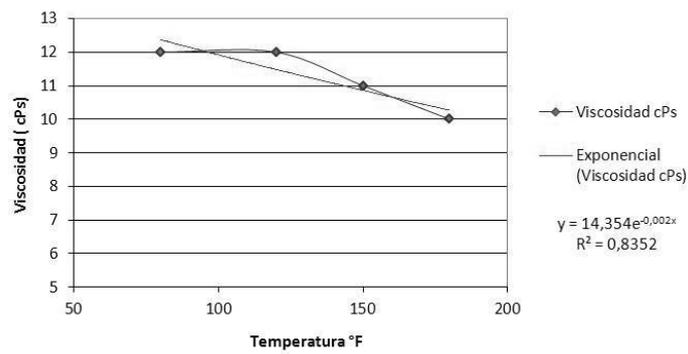


Fig.4. Gel fase sólida Viscosidad vs temperatura.

Aplicando la prueba de Friedman para determinar si existían diferencias significativa con respecto a la propiedad física (viscosidad) de los geles propuestos, se observó que la prueba arrojó un resultado de 6,5 estando por debajo del valor crítico de 7,81, para un nivel de significación $\alpha = 0,05$ y un grado de libertad = 3 de la Tabla Chi - cuadrado. Dicho resultado evidenció que no existen diferencias significativas entre los geles según la propiedad física en estudio, es decir que teóricamente se pueden formular sistemas gelificantes con las cuatro muestras.

Sin embargo, los sistemas gelificantes deben estar libres de sólidos que ocasionen taponamiento en la cara de la arena e impidan cumplir con sus funciones [4]. De esta manera, para conocer la cantidad de sólidos en suspensión de las muestras se aplicó la norma COVENIN 1343-78, a los geles Cristal, Fase Sólida, Fase Líquida, quedando exento el Mucílago debido a que no contiene sólidos como consecuencia de su composición química. Los mucílagos están compuestos por polisacáridos, que tienen características viscosas, carecen de sólidos y en contacto con el agua aumenta de volumen obteniéndose una solución coloidal [17].

En la tabla 4, se muestran los resultados de los porcentajes de sólidos que contenían cinco muestras de cada uno de los geles en estudio. Se observa que tanto el gel cristal como el gel fase sólida poseen un promedio de 40% y 68% respectivamente, por lo que fueron descartados, mientras que la fase líquida mostró un contenido de sólidos de 3,6%, el cual se asumió como aceptable, de acuerdo a criterios de los investigadores.

Tabla 4. Porcentaje de sólidos en suspensión del cristal sábila.

Muestra	Cristal (%)	Fase sólida (%)	Fase líquida (%)
1	40	80	4
2	40	90	3
3	30	90	4
4	50	80	4
5	40	90	3
Promedio	40	68	3,6

Una de las características que debe tener un gel para que forme el sistema gelificante es que debe poseer un pH ácido de esta manera se forma sin problemas. Los geles con pH ácidos permiten tiempos de gelificación idóneos, mientras que si el pH es básico mayores serán los tiempos de gelificación [4]. En la tabla 5, se muestra los valores obtenidos para el Mucílago y la Fase líquida la cual fue de 3,8 para ambos (ácido). Como la sábila ya posee un pH ácido no requirió de ningún componente adicional para hacerlo así, siendo un indicativo de un gel natural perfecto para la formulación de dicho sistema.

Tabla 5. pH de los geles naturales.

Muestras	pH
Mucílago	3,8
Fase líquida	3,8

Posteriormente se formularon dos sistemas gelificantes base sábila, los cuales se compararon con el gel comercial, al cual se denominó IJ. Cada muestra por separado se mezcló y se llevaron a baño de María a una temperatura de 180°F, superior a la temperatura de operaciones (150 °F) y así se determinaron los tiempos de inicio y finalización del proceso de gelificación. (Figura 5).

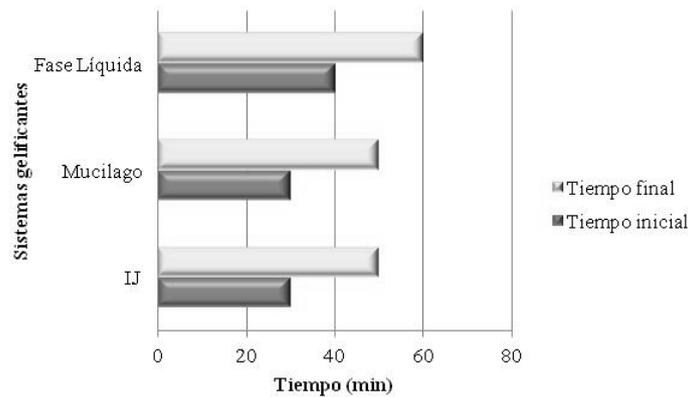


Fig.5. Tiempos de inicio y finalización de los tiempos de gelificación de los sistemas en estudio.

El resultado de los tiempos iniciales del proceso de gelificación se consideró satisfactorio al compararse con el sistema IJ. De esta manera, el sistema gel Mucilago comenzó su gelificación al mismo tiempo que lo hace el sistema IJ y el sistema gel fase líquida 10 minutos después, valor que aún se considera aceptable. Cabe destacar, que el tiempo inicial de gelificación, debe ser lo suficientemente amplio para que la mezcla, con baja viscosidad, penetre la formación antes de que comience a formarse el gel y prevenir el taponamiento de la tubería [4].

En cuanto al tiempo final del proceso de gelificación se obtuvo que el sistema gel Mucilago culmina en el mismo tiempo que el sistema IJ a los 50 minutos y el sistema fase líquida termina de gelificar a los 60 minutos e igualmente se considera aceptable. El tiempo final debe ser el menor posible considerando que la inyección se realizará durante la perforación, evitándose aumentar el tiempo que implica la construcción del pozo [4].

En lo que respecta a la estimación de la consistencia de los geles, los geles Mucilago y Fase Líquida se consideraron como geles no móviles moderadamente deformables, representados por la letra "J", siendo un resultado positivo, al compararlo con el gel IJ el cual se consideró con la letra "I", es decir un gel no móvil altamente deformable. En tal sentido, los sistemas formulados a base de sábila (*Aloe barbadensis*) son más fuertes que el sistema IJ, esto se le puede atribuir a que este tiene como activador un polímero disacárido, es decir está formado por la unión de dos monosacáridos, mientras que el Mucilago y Fase líquida tienen como activador un polisacárido, o lo que es lo mismo, están formado por muchos monosacáridos, que lo hacen más fuertes.

Igualmente, concerniente a la durabilidad del sistema, la misma fue una prueba que permitió determinar visualmente la degradación de los sistemas gelificantes, cuando se dejan por seis horas hasta alcanzar la temperatura ambiente (80°F). En tal sentido, se observó de manera cualitativa que los sistemas Mucílago y Fase líquida al estar en reposo y alcanzar la temperatura ambiente (80°F) pierden moderadamente su consistencia, pero sin llegar a tomar un aspecto líquido. (Ver Figura 6). Es decir que, los sistemas gelificantes Mucílago y Fase líquida a temperatura ambiente se clasificaron con la letra “E” (Un gel muy suave moderadamente móvil).



Fig. 6. Gel de sábila antes y después al degradarse a 80 °F

La pérdida de la consistencia moderada de los geles de sábila, pero sin llegar a tomar un aspecto líquido, limita su uso como sistema gelificante. Dicha transformación se presume que fue como consecuencia de que el gel de sábila puede permitir modificaciones cuando se extrae y está sujeto a cambios de color por oxidación o descomposición y alteraciones, debido a contaminación microbiana. [19]. Igualmente, al contener en mayor proporción agua permite que sea susceptible a la contaminación de diferentes microorganismos, tales como Aerobios mesofilos, Coliforme total, Coliforme fecal, Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Staphylococcus, mohos y levaduras [20].

Como parte final de la investigación se sometieron los geles a pruebas de compatibilidad de fluidos empleando agentes contaminantes a distintas concentraciones (Ver Tabla 6) y se aplicó nuevamente la prueba de la botella.

Tabla 6. Formulaciones de compatibilidad de sistema gelificante base sábila con contaminantes (espaciador, petróleo y agua sintética de formación).

Sistema gelificante	Proporción (%) Sistema gelificante	Proporción (%) espaciador	Consistencia Tipo	Descripción
Mucílago	100	0	J	Gel no móvil moderadamente deformable)

	75	25	I	Gel no móvil altamente deformable
	50	50	I	Gel no móvil altamente deformable
Fase Líquida	100	0	J	Gel no móvil moderadamente deformable)
	75	25	I	Gel no móvil altamente deformable
	60	50	H	Gel suave poco móvil

Como se observa en la tabla anterior los sistemas gelificantes presentaron cambios en su consistencia al aumentar el porcentaje del contaminante, el sistema Mucilago cambió su consistencia J (100% gel) a I para concentraciones 75% gel 25% contaminante y 50% gel 50% contaminante. Mientras que el sistema Fase líquida cambió de consistencia J (100% gel) a I (75% gel 25% contaminante) y a H (50% gel 59% contaminante). Estas dos respuestas dan un indicativo de como se podría emplear los sistemas gelificantes propuestos en condiciones reales en pozo. Igualmente, los cambios en la consistencia de los geles se debieron al incremento de pH de ácido a básico como consecuencia de la presencia de carbonato de calcio en el agente contaminante. Cabe destacar que el sistema gelificante Mucilago logró una consistencia tipo I al ser contaminado, la misma obtenida para el sistema gelificante IJ comercial sin ser contaminado.

4. CONCLUSIONES

- Las bases obtenidas: Mucilago y Fase líquida, pueden emplearse para formular un sistema gelificante.
- Los tiempos de gelificación de inicio y finalización del Mucilago y Fase líquida se consideran aceptables al compararlos con el sistema IJ.
- Los sistemas gelificantes base sábila Mucilago y Fase líquida clasificados como Geles no móviles moderadamente deformable, denotado por la letra "J", son más consistentes que el sistema IJ (I).
- Los sistemas gelificantes Mucilago y Fase líquida no son estables bajo temperatura ambiente (80 °F), este aspecto negativo lo transforma en un gel suave moderadamente móvil (E).
- El sistema gelificante Mucilago presentó un mejor comportamiento que el sistema Fase líquida al ser contaminado, no obstante no se descarta ninguno.

REFERENCIAS

1. Dwight, S. Cementing, Richardson Society Of Petroleum Engineers, Volumen 4, 32 a 55. (1998)
2. Bailey, Bill, Crabtree, M, Tyrie, J, Elphick, Jon: Control del agua. Oilfield Review. 32 a 53 (2010)
3. Pérez, F.; Pino, F., Salazar, O. Diseño de una técnica para el análisis de zonas de acuíferos en pozos horizontales del Campo Melones del Distrito Sur San Tomé. Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Venezuela. (1996)
4. RAUSEO, O; FERNÁNDEZ, J; CASTAÑEDA E. Propuesta de uso de la tecnología multigel en el Campo Melones, Distrito San Tomé para prevenir la producción de agua de arenas atravesadas durante la perforación. SEFLU CEMPO (2006)
5. Mejías, F., Fernández, I. Desarrollo de un nuevo gel resistente a alta temperatura. PDVSA Intevep, Los Teques, Venezuela. (1996)
6. Torres, G y Ozaeta, A. Diseño de máquina para ensayos mecánicos para hoja de aloe vera Scientia et Technica No 48, 29 a 34 (2010)
7. Plaskett, L. Aloe vera, Aloe in alternative medicine practice. Whole leaf homepage. <http://www.wholeleaf.com>.
8. Vila R y Guinea M. Gel de Aloe. Revista de Fitoterapia. 1(4) 245 a 356. (2001)
9. Larionova, M., Merendez, R., Valiente, O. y Fuste V. *Estudio químico de los polisacáridos presentes en Aloe vera L y Aloe arborescens Miller cultivadas en Cuba*. Plant Med. Vol 9_04 a 09 (2006)
10. Nadales, R. Estudio comparativo de tecnologías convencionales para la remoción de gases ácidos en la industria del gas, con fracciones provenientes del Aloe Vera. Universidad Central de Venezuela. Trabajo de grado no publicado. (2007)
11. Domínguez, R. Arzate J, Chanona J. Welti S, Alvarado J, Calderón G, Garibay V y Gutiérrez G. El gel de aloe vera: estructura, composición química, procesamiento, actividad biológica e importancia en la industria farmacéutica y alimentaria. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 11, No. 1 .23 a 43. (2011)
12. Halliburton. Hojas técnicas de calidad de productos. (2008).
13. COVENIN 1343-78. Norma Venezolana de Frutas, Vegetales y Productos Derivados. 3 a 6. (1978)
14. PDVSA, Intevep. Química de los sistemas multiGel . Manual. De calidad.. (2010)
15. Rivera, E; Introducción a la mecánica de fluidos. <http://www.erivera-2001.com>.
16. Vila, A; Sedano, M; López, J y Juan, A. Correlación lineal y análisis de regresión. www.UOC.com.
17. Granados, d y Castañeda, A. Sábila: *Aloe barbandesis Mill*; planta agroindustrial (medicinal) del desierto. Universidad Autónoma de Chapingo, Dirección de Difusión Cultural. México. 45 a 53. (1998)
18. Cob, C., Nubia, N., Tello, C., Sánchez, E., Vargas, J., Vargas, L Y Tamayo, J. Actividad de la polifenoloxidasas en el gel de sábila (*Aloe miller*) Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, vol. 11, núm. 2, 221 a 227. 2010.

19. Londoño, L. Análisis específico de fuentes contaminantes microbiológicas en productos naturales de aloe vera, fabricados en la empresa agro bamboo de Colombia Limitada. Pereira, Colombia.