



CARACTERIZACIÓN DE ALMIDONES NATIVOS Y EFECTO SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA

CHARACTERIZATION OF NATIVES STARCHES AND THEIR EFFECT ON PHYSICAL PROPERTIES OF WATER-BASED DRILLING FLUIDS

Rubén Vega-Mejía^{1,*}

Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Departamento de Ingeniería de Petróleo. Maturín, Venezuela.

(recibido/received: 19-02-2024; aceptado/accepted: 04-07-2024)

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito comparar las propiedades funcionales de cinco almidones (ocumo, yuca, mapuey, ñame congo y caña agría) desarrollados en la universidad y conocer su efecto al ser usados como controladores de filtrado sobre las propiedades físicas de un fluido base agua. Durante el estudio de las propiedades funcionales se detectó en los almidones buen contenido de amilosa, necesaria para el buen desempeño de los fluidos de perforación, pH ácido característico de los almidones naturales y buen rendimiento para la adsorción de agua. Los fluidos formulados presentaron buena reología y filtrado menor a diez para los almidones de ocumo, yuca y caña agría. Caso opuesto los almidones de mapuey y ñame congo cuyo valor fueron superiores a diez. El diseño factorial evidenció diferencias estadísticas significativas entre los almidones (bloques) con respecto al comercial, más no entre este y almidón de caña agría. Igualmente, hubo diferencias estadísticas entre las propiedades físicas de los almidones con el comercial, excepto el almidón de caña agría que solo difirió en el filtrado respecto al comercial. A pesar de los resultados, no se descartan los otros fluidos, porque su uso depende de las condiciones operativas de perforación.

Palabras clave: Almidón; Filtrado; Propiedades Físicas; Propiedades Funcionales.

ABSTRACT

The purpose of the research was to compare the functional properties of five starches (ocumo, cassava, mapuey, congo yam and bitter cane) developed at the university and to determine their effect when used as filter controllers on the physical properties of a water-based fluid. During the study of the functional properties, good amylose content was detected in the starches, necessary for the good performance of drilling fluids, acid pH characteristic of natural starches and good performance for water adsorption. The formulated fluids presented good rheology and filtering less than ten for the ocumo, cassava and sour cane starches. The opposite was the case of mapuey and congo yam starches, whose values were higher than ten. The factorial design showed significant statistical differences between the starches (blocks) with respect to

* Corresponding author.

E-mail address: rvegas@udo.edu.ve

the commercial one, but not between it and sour cane starch. Likewise, there were statistical differences between the physical properties of the starches with the commercial one, except for sour cane starch, which only differed in filtering compared to the commercial one. Despite the results, the other fluids are not ruled out, because their use depends on the drilling operating conditions.

Keywords: Atarch, Filtrate, Functional Properties, Physical Properties.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades en la extracción de hidrocarburos y la cual ha ido evolucionando a pasos agigantados en el desarrollo tecnológico de los materiales utilizados en ella, es la perforación de pozos (Santivañez-Huarcaya et al., 2019). En tal sentido, los fluidos de perforación son un requisito esencial para la perforación segura y eficiente de todo tipo de pozos de petróleo y gas (Davoodi et al., 2023). Y es que uno de los factores más importantes que determinan el éxito de una operación de perforación es la selección adecuada de un fluido. La composición del fluido en cada operación se determina en función de la situación y las necesidades (Needaa et al., 2016).

Los fluidos de perforación de base acuosa son los más utilizados durante el proceso de perforación en comparación con los fluidos de perforación a base de aceite, esto como respuesta a los requisitos medioambientales exigidos actualmente (Soto et al., 2020); (Li et al., 2021). El fluido base de agua tiene una amplia aplicación porque es fácil de formular, respetuoso con el medio ambiente y su uso representa entre el 90 – 95 % a nivel mundial (Dankwa et al., 2018 a; Dankwa et al., 2018 b).

Una de las funciones de los fluidos de perforación es la de controlar el filtrado a través de aditivos. Los aditivos controladores de filtrado son reactivos químicos que tienden a ser absorbidos preferentemente por la matriz de formaciones rocosas permeables durante la perforación; asimismo, los reductores de filtración también actúan para reducir la permeabilidad de la torta de filtración (Davoodi et al., 2023).

Durante los últimos cincuenta años, el almidón se ha utilizado ampliamente en sus formas nativas o modificadas, como agente de control de la filtración en fluidos de perforación, debido a su abundancia, bajo coste y biodegradabilidad (Ghazali et al., 2015). Según Nasiri et al. (2018) su uso en la industria de perforación es debido a su solubilidad en agua, además de reducir la pérdida de fluido, él se hincha en el agua y es capaz de mejorar la viscosidad del fluido. Sin embargo, una de las principales desventajas del almidón es su ineficacia en condiciones de alta presión y alta temperatura (HPHT).

Las propiedades de los geles de almidón pueden variar como consecuencia del tamaño del gránulo de almidón, contenido de fósforo y de amilosa, el complejo amilosalípido y la estructura de la amilopectina (Vargas et al., 2016). Por lo que la optimización de las propiedades reológicas es imprescindible durante la operación de perforación para evitar problemas comunes, como el atascamiento de tuberías debido a la acumulación de cortes, el control del pozo y la pérdida de fluidos en la formación debido a una presión excesiva aplicada (Luo et al., 2017; Busch et al., 2018).

Importantes estudios sobre el uso del almidón se han desarrollado a nivel mundial demostrando la importancia del tema para la industria de los hidrocarburos, entre los más recientes destacan: Dankwa et al. (2018 a) los cuales estudiaron la almidón de mandioca dado a la capacidad de producción del tubérculo en Ghana, Assi, (2018) y Santivañez-Huarcaya et al. (2019) analizaron el uso de almidón de papa, Cescon et al. (2018) estudiaron los derivados catiónicos del almidón, Novriansyah (2021) analizó el almidón de mandioca, Kelvin y Dune (2022) estudiaron el efecto del almidón de mandioca y la fibra de coco en las propiedades reológicas y el control de la pérdida de fluido del fluido de perforación a base de agua, Aguirre-Mogollón y Tovar- Moreno (2022) evaluaron el almidón de plátano, Wu et al. (2023) estudiaron un nuevo copolímero de injerto de almidón reticulado en un fluido de perforación base de agua y Ramos Aguirre et

al. (2023) investigaron el control de filtrado de fluidos de perforación petrolero de bajo impacto ambiental mediante el uso de almidón de yuca.

Conforme a lo descrito y basado en la línea de investigación denominada, creación de aditivos no convencionales para la industria petrolera, perteneciente al autor; en la Universidad de Oriente Núcleo de Monagas se han desarrollados almidones nativos para ser empleados como posibles controladores de filtrado en el área de perforación de pozos de petróleo y gas, como lo son: almidón de ocumo chino (*Colocasia esculenta*) (Pérez et al., 2015), almidón de mapuey (*Dioscórea trifida*) y ñame congo (*Dioscórea bulbífera*) (Teresén et al., 2017), almidón de caña agría (*Costus spicatus*) (Guedez et al., 2019) y almidón de yuca modificado (*Manihot esculenta*) (Granados et al., 2019).

En líneas generales, el desarrollo de esta investigación contribuye al posible desarrollo de productos de bajo costo y bajo impacto ambiental sin ninguna alteración química para asegurar su funcionamiento, los cuales se realizan en la Universidad de Oriente desde al año 2015, permitiendo generar una línea de investigación que se une a los esfuerzos mundiales por desarrollar aditivos naturales para la industria de petróleo y gas natural.

En tal sentido, la presente investigación tuvo como propósito comparar las propiedades funcionales de los almidones naturales previamente estudiados, así como las propiedades reológicas de los fluidos de perforación formulados con dichos almidones para conocer quién presentó un mejor comportamiento y así proseguir con otras investigaciones que permitan tratarlo químicamente y ver si es posible mejorar su estabilidad térmica y por ende su aplicabilidad

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las investigaciones se llevaron a cabo en el laboratorio de perforación de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. Los tubérculos ocumo chino y mapuey fueron adquiridos del mercado local, mientras que la yuca y ñame congo se recolectaron de las zonas de Orocuai y Azagua del estado Monagas respectivamente, la caña agría se obtuvo de los morichales adyacentes a la universidad.

2.1. Conocimiento de las propiedades tecno-funcionales de los almidones en estudio.

Las metodologías empleadas para la obtención de los almidones en estudio fueron: almidón de ocumo (AO), almidón de mapuey (AM) y ñame congo (AÑC) (Pacheco & Techeira, 2009), almidón de yuca (AY) (Hernández et al., 2008) y almidón de caña agría (ACA) (Pinzón et al., 2013). A los almidones se le estudiaron las propiedades funcionales que están relacionadas con los fluidos de perforación. Dichas propiedades y su método de medición fueron: pH (Comisión Venezolana de Normas Industriales [COVENIN], 1990), densidad (Aristizabal & Sánchez, 2007), gravedad específica (comparando la densidad del fluido de almidón con un fluido patrón como es el agua), amilosa/ amilopectina (Pinzón et al., 2013), dextrosa (COVENIN, 1990), viscosidad aparente (Bello et al., 2002) e índice de absorción de agua (Anderson et al., 1969).

2.2. Cotejo de las propiedades físicas de los fluidos de perforación con los almidones en estudio.

Los fluidos fueron formulados para densidades entre 848,1 y 997,8 kg/m³ de acuerdo a las concentraciones mostrada en la tabla 1. La única variación en la formulación para cada caso en estudio fue la concentración de los almidones.

Mediante la aplicación de la norma API RP 13B-1 (American Petroleum Institute [API], 2005) se determinaron después de envejecimiento dinámico a 65,6 °C (150 °F) y durante 16 h, las propiedades físicas de: viscosidad plástica (VP), punto cedente (PC), geles a 10s (GS), geles 10 min (GM) y filtrado (FF).

Tabla 1. Formulación empleada en los fluidos base agua

Nombre	Gravedad específica	Concentración (g/cm ³)	Volumen (mL)
Goma xántica	1,5	2,00	1,33
Glicol	1,0	7,00	6,98
Almidón	--	..	--
Gasoil	0,86	28,00	32,56
Soda cáustica 98%	2,18	0,50	0,23
Agua	1	260,81	260,81
Carbonato	2,7	116,86	43,28

2.3. Análisis estadístico del comportamiento de los almidones como controladores de filtrado en fluidos de perforación.

El análisis estadístico estuvo orientado a conocer si existían diferencias estadísticas significativas entre los fluidos en estudio formulados con almidones nativos (AO, AY, AM, AÑC Y ACA) con respecto a un almidón comercial (AC). El estudio se enmarcó en un diseño factorial ($\alpha=0,05$), conformado por los seis fluidos (bloques), cinco propiedades (factores) y tres repeticiones, obteniéndose así una parcela experimental de 90 experimentos.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los almidones obtenidos a partir de diferentes variedades de tubérculos y cereales presentan ciertas propiedades funcionales que modifican la viscosidad y estabilidad de las suspensiones de los fluidos de perforación en función de la temperatura, así como el pH. A continuación, en la tabla 2 se muestran los diferentes valores de las propiedades funcionales para cada uno de los almidones naturales en estudio.

Tabla 2. Propiedades funcionales de los almidones naturales en estudio.

Propiedad	Almidones					
	AO	AY	AM	AÑC	ACA	
pH	6,4	4,1	5,22	6,24	7,22	
Densidad (g/mL)	1,25	1	1,59	1,92	0,64	
Gravedad específica	1,25	1	1,59	1,92	0,64	
Dextrosa	66,7	70,12	71,79	65,22	65,22	
Viscosidad aparente (Pa.s)	0,016	0,021	1,26	0,54	0,016	
Amilosa / amilopectina	12,1/ 87,8	16,7/83,3	12,55/87,45	26,36/73,64	26,36/73,64	
Índice de absorción de agua (IAA) (g/g)	60 °C	2,3	5,80	3,42	4,00	1,54
	70 °C	3,4	7,87	4,81	7,90	1,92
	80 °C	5,7	12,48	9,13	12,05	2,05

Los pH mostrados por los diferentes almidones naturales excepto ACA resultaron ácidos, coincidiendo con otras investigaciones tales como: almidón de *Artocarpus heterophyllus* Lam con 5,5 de pH (Adewum et al., 2018), 4,14 almidón de ñame blanco y 4,25 almidón de ñame morado (Bou Rached et al., 2006), 5,96 almidón de yuca (Meaño & Castillo, 2019), 6,7 almidón de ocumo chino (Palomino et al., 2010) y 5,3 almidón de maíz (Rivoli & Pérez, 1996). Este comportamiento es normal de acuerdo a lo expresado por (Aristizabal & Sánchez, 2007), quienes aseguran que el pH de un almidón natural debe estar entre 6 y 6,5.

Sin embargo, se observa que AY y AM están por debajo de este rango, ello constituye una limitante en cuanto a su uso, porque los hace sensibles a la temperatura y a los esfuerzos de corte extremos (Rivas et al., 2008). Asimismo, bajos pH provocarán la corrosión de las tuberías y de los equipos de perforación, así como

el aumento de la viscosidad del fluido. ACA tendió a neutro y esto lo hace susceptible a degradación bacteriana. El pH afecta la solubilidad del polímero y determina frecuentemente el grado de ionización de los grupos funcionales a lo largo de la cadena del polímero (MI -SWACO, 2001). Para solventar dichos inconvenientes en la industria petrolera se emplea soda caustica para controlar el pH de los fluidos.

La densidad y gravedad específica de los almidones varió de 0,64 g/mL (ACA) a 1,92 g/mL (AÑC), valores que corresponden con investigaciones previas como (Meaño & Castillo, 2019) quienes presentaron valores de 1,33 g/mL para el almidón de yuca, 1,38 g/mL almidón de arracacha (Rodríguez et al., 2005), 0,97 g/mL almidón de sagú (Granados et al., 2014), 0,78 g/mL almidón de papá y 0,72 g/mL almidón de ocumo (Reyes et al., 2019). Según Aristizabal y Sánchez (2007) el almidón natural debe tener una densidad promedio de 1,56 g/mL. Igualmente, la densidad y gravedad específica de los almidones comerciales para la formulación de fluidos de perforación deben oscilar entre 1,2 y 1,5 (Samán Tecnología Integral en Petróleo, 2013).

La gravedad específica es importante para determinar mediante balance de materiales la cantidad de almidón en la formulación, por lo tanto, almidones con menores valores de gravedad específica aportaran mayor g/cm³ al fluido y viceversa, pero este debería oscilar entre 2 a 10 g/cm³ (2 a 10 lb/bl en unidad de campo).

Para el porcentaje de dextrosa o azúcares reductores se obtuvieron valores entre 65,22 para AÑC y ACA, y 71,79 para AM, los cuales estuvieron en el mismo rango de los resultados reportados por Tejeda et al. (2011) para el almidón de yuca (*Manihot sculenta*) de 77,86-68,18 %; y superiores a los de almidón de ñame (*Dioscórea rotundata*) con 54,22-44,53 % (Meaño et al, 2014). De acuerdo al apartado 5.6 de la norma Covenin 920-20 (COVENIN, 1990), con el contenido de dextrosa se determina el contenido de almidón, siendo este directamente proporcional, por lo que se puede deducir que a mayor porcentaje de dextrosa, hay mayor cantidad de almidón. Valores bajos de esta propiedad son indicativos de un proceso de extracción ineficiente (Aristizabal & Sánchez, 2007).

Aprianita et al., (2009) sostienen que una alta viscosidad que presenten los almidones, los hace potencialmente aprovechables para aumentar el poder espesante. Asimismo, esto es indicativo de que producen una mayor cantidad de componentes lixiviados hacia el medio circundante y por ende el gel formado es más viscoso (Bou Rached et al., 2006). Una viscosidad aparente alta denota una capacidad del almidón para enlazar moléculas de agua y desarrollar una estructura más organizada (Jaramillo, 2013). La literatura muestra una amplia gama de valores de viscosidad plástica para almidones naturales como 0,014 y 0,033 Pa.s para almidones de plátano y maíz respectivamente (Bello et al., 2002) hasta 25 Pa.s para almidón de papa (Vargas et al., 2016). Los valores obtenidos en la propiedad para los almidones en estudio están dentro del rango mostrado. Cabe destacar, que la viscosidad aparente deseada para los almidones empleados en fluidos base agua debe ser baja (Samán Tecnología Integral en Petróleo, 2013).

La propiedad mecánica del gel de almidón depende de varios factores como la reología, características de la matriz de amilosa, rigidez de los gránulos de almidón gelatinizado, fricción de volumen y las interacciones entre las fases dispersa y continua del gel (Sandhu & Singh, 2007). Los valores de amilosa de los almidones de AO, AY y AM coinciden con los indicados para ocumo chino (12,69) y los almidones de AÑC y ACA con el de ocumo blanco (26,1) presentados por (Palomino et al., 2010). A su vez la cantidad de amilosa de AÑC y ACA también se asemejan al reportado por (Adewum et al., 2018) de 24,9 para el almidón de *Artocarpus heterophyllus* Lam.

No obstante, son disimiles a los reportados por Techeira et al. (2014) para diferentes variedades de yuca, batata y ñame, los cuales estuvieron en el rango de 28,25 y 37,22, también son distintos al contenido de 60,63 de amilosa para de ñame congo alcanzado por Meaño et al. (2014). Estas diferencias pueden ser atribuidas al hecho de que el contenido de amilosa de los gránulos de almidón varía con la fuente botánica y es afectado por las condiciones climáticas y tipo de suelo durante el crecimiento (Bou Rached et al., 2006).

En las actividades de perforación la disminución del filtrado del fluido al medio poroso se debe a la reducción del agua libre en el sistema y a la obstrucción de los poros a través del revoque ocasionado por la amilosa, por lo que es importante tener altos valores de la propiedad.

Concerniente al índice de absorción de agua (IAA), se observa que este aumentó con la temperatura, el cual es un comportamiento lógico porque el incremento de la temperatura ocasiona la rotura de los puentes de hidrogeno intermoleculares permitiendo así la absorción irreversible y progresiva de agua. Pero, AY, AM y AÑC mostraron un mayor valor del IAA respecto a AO y ACA, indicativo de que estos dos últimos almidones necesitan mayores temperaturas de gelatinización. Las diferencias en el IAA de los almidones nativos pueden estar relacionada con la fuente biológica y el tamaño y forma del gránulo (Lindeboom et al., 2004).

Referente a las propiedades físicas de los fluidos de perforación formulados con los almidones en estudio y de acuerdo a las concentraciones de los aditivos reflejados en la tabla 1, se tuvo que para lograr la densidad deseada de los fluidos de perforación se necesitaron de: 8 g/cm³ de almidón de ocumo chino (*Colocasia esculenta*), 3 g/cm³ de almidón de yuca (*Manihot esculenta*), 15 g/cm³ de almidón de mapuey (*Dioscórrea trifida*), 10 g/cm³ de almidón de ñame congo (*Dioscórrea bulbifera*) y 4 g/cm³ de almidón de caña agría (*Costus spicatus*).

Formulados los fluidos y luego del envejecimiento dinámico, la propiedad de VP (figura 1) mostró valores que oscilaron entre un mínimo de 0,008 Pa.s para el fluido con almidón de mapuey hasta un máximo de 0,02 Pa.s para el fluido con almidón de caña agría. Los valores de VP se consideraron aceptables, porque no fueron mayores al doble de las densidades de los fluidos (observable en el sistema inglés de unidades). Sin embargo, se detalla que en los fluidos con mayores concentraciones de almidón (AO, AM y AÑC) disminuyó la propiedad, esto es contrario a lo reflejado por Elkatatny (2019) con almidón de yuca y Nasiri et al. (2018) con almidón de maíz quienes obtuvieron un incremento de la propiedad al aumentar la concentración.

El comportamiento descrito pudo ser consecuencia del tamaño de las partículas de los almidones en estudio (aspecto no controlado en las investigaciones) y de sólo variar en la formulación la concentración de estos, manteniendo constantes las cantidades de los demás aditivos como la goma xántica, la cual altera la viscosidad de la fase líquida. La viscosidad plástica es afectada principalmente por: la concentración de sólidos, el tamaño y la forma de los sólidos, la viscosidad de la fase fluida, la presencia de algunos polímeros de cadena larga (ESVENCA, 2010).

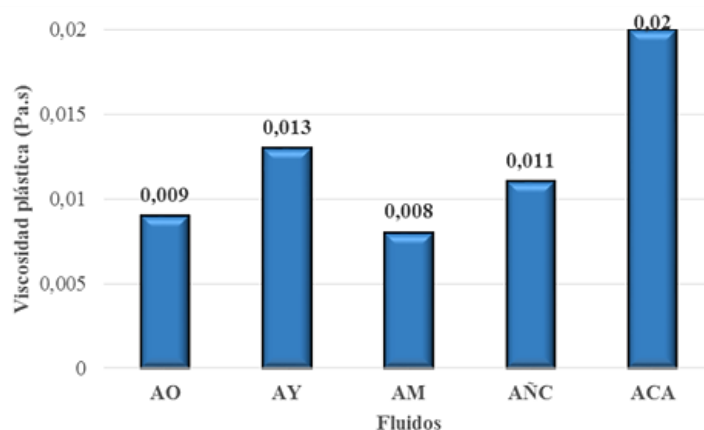


Figura 1. Valores de la propiedad viscosidad plástica (VP) para los fluidos en estudio.

Al analizar el PC (Figura 2) se detalla que el mayor valor fue para el fluido con ACA y un comportamiento opuesto lo mostró el fluido con AO, mientras que los fluidos con los almidones AY, AM y AÑC exhibieron una conducta similar entre ellos (entre 19,5 y 20 Pa). Un aumento en el valor del PC es consecuencia de la existencia de una mayor cantidad de partículas que reaccionan y crean una mayor fuerza de atracción entre estas. Cabe destacar, que los valores obtenidos de punto cedente son aceptables, porque estos son mayores a la densidad de fluido (observable en unidad inglesa). Asimismo, altos valores de punto cedente indican que existe una buena atracción entre los aditivos en condiciones dinámicas o de flujo, lo que adjudica al fluido de perforación una buena capacidad de transporte (Prieto, 2007). Igualmente, los valores de viscosidad plástica bajos, permiten una limpieza del hoyo eficiente, así mismo una buena tasa de penetración (MI -SWACO, 2001).

No obstante, se detalla nuevamente que la mayor concentración de almidón no influyó sobre la propiedad como lo reflejaron Elkatatny (2019) y Nasiri *et al.* (2018) en sus respectivas investigaciones, por lo que, además de lo descrito con anterioridad sobre las posibles causas de este comportamiento, habría que añadir que quizás estos almidones se degradaron térmicamente o el método empleado para su obtención no fue el mejor o se contaminaron durante su manipulación.

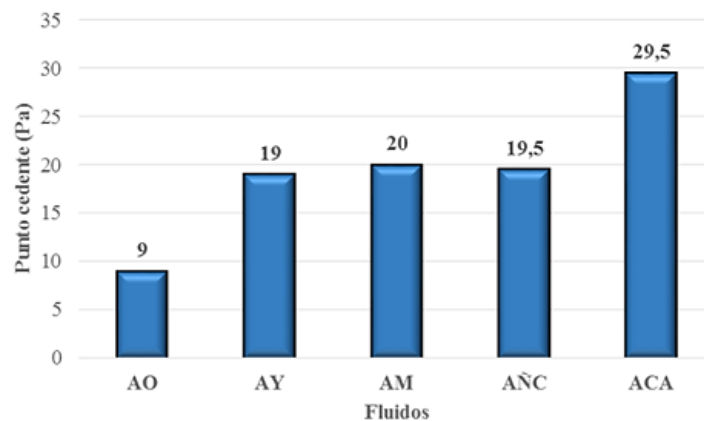


Figura 2. Valores del punto cedente para los fluidos en estudio.

A pesar de lo descrito, al observar el comportamiento de las dos propiedades estudiadas (VP y PC) de los fluidos formulados con almidones naturales, estos demuestran un comportamiento de reología inversa (mayor PC respecto a la VP), el cual es típico de este tipo de fluido. Asimismo, la relación PC/VP debe ser superior a 1,5 para obtener mejores condiciones de limpieza del pozo y todos los fluidos cumplen con esta premisa.

Cuando en el pozo no circula el fluido, este debe formar una fuerza de gel que le permita mantener los cortes en suspensión. La fuerza del gel se mide después de la condición estática en diferentes tiempos (10 segundos y 10 minutos) a baja velocidad de cizallamiento (3 rpm). En los fluidos en estudio se deseó que los fluidos de perforación proporcionaran una reología uniforme, lo que significa que el valor de la fuerza del gel no aumenta considerablemente con el tiempo. En la figura 3, se observa que los geles a los 10 s y 10 min para los fluidos con almidones naturales mostraron geles planos, resaltando ACA que para ambos tiempos fue el mismo.

Un aumento en la concentración del almidón en los fluidos con AM y AÑC no influyó en el incremento de la propiedad, tal como lo evidenciaron Elkatatny (2019) y Nasiri *et al.* (2018) en sus investigaciones.

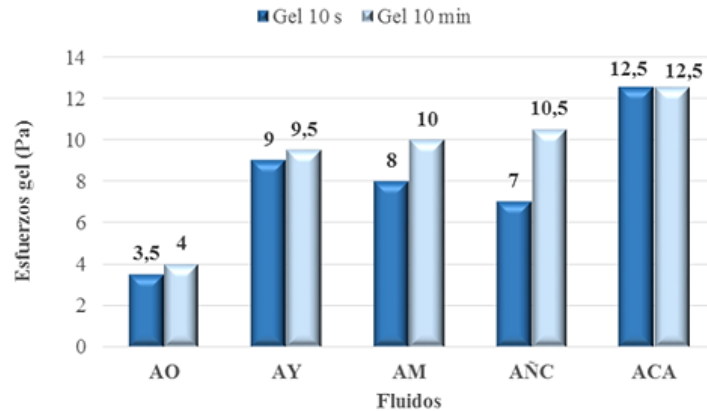


Figura 3. Valores de los esfuerzos gel a los 10 s y 10 min para los fluidos en estudio.

Los valores mostrados de las tres propiedades anteriores VP, PC y geles (10 s y 10 min) concuerdan con los indicados para las propiedades en fluidos de perforación a distintas concentraciones, empleando como controlador de filtrado almidón de plátano (Ariza & Fajardo, 2011), almidón de achira (Ariza *et al.*, 2013) y almidón de papa (Santivañez-Huarcaya *et al.*, 2019).

Los polímeros reducen la pérdida de filtrado de varias maneras: sellando las grietas del revoque del fluido con partículas de polímeros, encapsulando los sólidos mediante la formación de una película que reduce la permeabilidad del revoque y mediante el incremento de viscosidad de la fase líquida (Ariza *et al.*, 2013). El filtrado mostrado, por los distintos fluidos presentaron dos grupos, uno con valores menores a 10 mL/30 min (AO, AY y ACA), el cual es el mayor valor recomendado a nivel de laboratorio en la industria y otro superiores a la referencia (AM y AÑC). Este comportamiento es diferente al mostrado por Elkatatny (2019) y Nasiri *et al.* (2018) quienes mejoraron la propiedad al incrementar la concentración del aditivo. Sin embargo, el filtrado obtenido con los distintos fluidos se aproxima a los mostrados por Ariza y Fajardo (2011), Ariza *et al.* (2013) y Santivañez-Huarcaya *et al.* (2019) empleando almidones naturales.

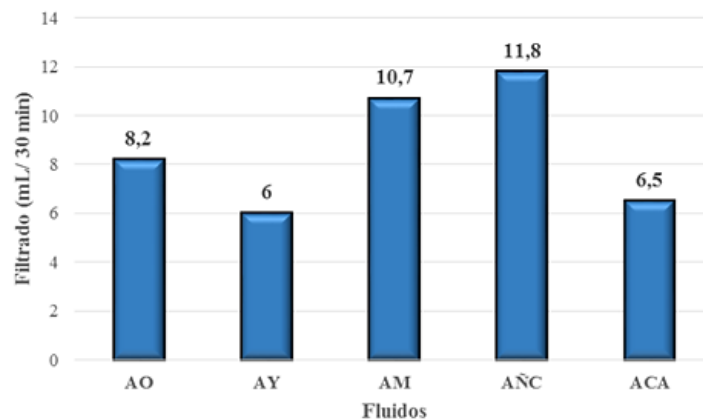


Figura 4. Valores del filtrado para los fluidos en estudio.

Para el modelo estadístico aplicado, en la tabla 3 se muestran los valores de las repeticiones para los factores (propiedades) de acuerdo a los bloques en estudio (almidones).

Tabla 3. Diseño factorial aplicado.

Bloque (Fluido)	Factores (Propiedades)	Repeticiones		
		R ₁	R ₂	R ₃
AC	Viscosidad plástica (VP)	0,02	0,022	0,02
	Punto cedente (PC)	25,5	24,5	26
	Gel 10 s (GS)	6,5	5,75	6,25
	Gel 10 min (GM)	11	11,5	12,5
	Filtrado (FF)	4,1	3,5	5
AO	VP	0,01	0,009	0,008
	PC	9,75	4,25	4,5
	GS	3,5	3,5	3,7
	GM	4,5	4	3,5
	FF	8,2	9,4	7
AY	VP	0,013	0,014	0,015
	PC	16,5	19,5	19
	GS	9,5	9,5	9,5
	GM	10,5	10	9,5
	FF	6	6	6
AM	VP	0,007	0,009	0,008
	PC	20,5	20	20
	GS	8	8,5	8,5
	GM	10	10,5	10,5
	FF	10,8	11	10,4
AÑC	VP	0,011	0,011	0,012
	PC	19,5	19,5	19
	GS	7	6,5	6,5
	GM	10,5	11	11
	FF	11,6	12,3	11,6
ACA	VP	0,02	0,015	0,015
	PC	32,5	34,5	21
	GS	14	15	14
	GM	12	12	13,5
	FF	6	6,6	7

El análisis de varianza (Tabla 4) reflejó un coeficiente de Pearson con un ajuste fuerte y un coeficiente de variación (CV) menor que 30, por lo que se considera aceptable la variación entre los datos.

Tabla 4. Análisis de varianza.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Repeticion	90	0,85	0,83	27,38

En el análisis de varianza tipo II (Tabla 5) se observa que los p-valor tanto para los bloques como para las propiedades son menores a 0,000, por lo que existen diferencias significativas (p-valor < 0,005).

Tabla 5. Análisis de varianza tipo II.

F. V	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13171,26	9	1463,47	49,66	< 0,0001
Bloque	2422,36	5	484,44	16,44	< 0,0001
Propiedad	10748,9	4	1687,23	91,19	< 0,0001
Error	2357,51	80	29,47		
Total	15528,76	89			

Aplicando el test de Duncan para los bloques, se percibe en la figura 5, que se obtuvieron tres grupos funcionales (letras iguales) ordenado de menor a mayor. Así, el fluido con almidón de ocumo (AO) representado por la letra A difiere del comportamiento presentado por los almidones de mapuey (AM), yuca (AY) y ñame congo (AÑC) (letra B) y a su vez, ambos grupos son disimiles del grupo funcional C, conformado por los fluidos con almidón comercial (AC) y caña agría (CA).

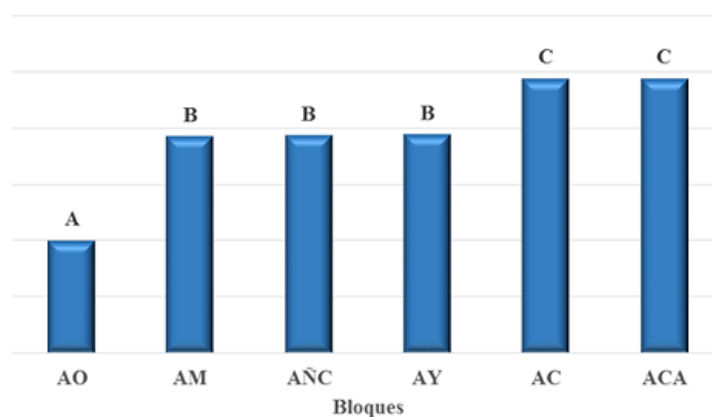


Figura 5. Test de Duncan para los bloques.

Letras distintas expresan diferencias estadísticas significativas (p-valor < 0,05)

Al aplicar el test de Duncan para las propiedades físicas de los fluidos se observa (Tabla 6) que el almidón de caña agría no presenta diferencias estadísticas significativas con el almidón comercial (letras iguales) en las propiedades de viscosidad plástica, punto cedente y geles a los 10s y 10 min, mientras que los otros fluidos formulados con los almidones restante sí (letras distintas). En la única propiedad donde hubo diferencias estadísticas significativas de todos los almidones con respecto al comercial fue en el filtrado donde este se identificó con la letra A, mientras que los fluidos con almidón de yuca y caña agría fueron nombrados con la letra B.

Tabla 6. Test de Duncan

Propiedad	Fluidos					
	AC	AO	AY	AM	AÑC	ACA
VP	C	A	B	A	A, B	C
PC	C	A	B	B	B	C
G10s	D, E	A	C, D	B, C	B	E
G10min	C, D	A	B	B	B, C	D
Filtrado	A	C	B	D	D	B

Letras distintas expresan diferencias estadísticas significativas (p-valor > 0,05).

El estudio estadístico demostró que el almidón de caña agría es el que mejores propiedades físicas presentó al ser el más semejante al almidón comercial, en cuanto a los valores de las propiedades en estudio, Sin embargo, hay que destacar que el almidón comercial empleado en la formulación, es un almidón tratado químicamente para mejorar sus propiedades, mientras que los demás almidones son naturales.

Es significativo que el almidón de caña agría haya obtenido el mejor desempeño, porque tiene como ventaja que es una mata que suele crecer en montones, se expande fácilmente y su uso es limitado. Además, se desarrolla prácticamente en toda Venezuela, en climas cálidos, semi cálidos y templados entre los 800 y los 2600 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo a Chimbo (2014) crece con mejor apariencia estando en la sombra, con poca exposición al sol y puede adaptarse a casi cualquier medio sin mayores cuidados.

Finalizada la investigación, es importante destacar que se obtuvieron resultados aceptables en todas las propiedades físicas de los almidones formulados por los autores y a pesar de las diferencias numéricas ninguno puede ser rechazado, porque su aceptación o no está sujeto a los valores de campo que se requieran para perforar un área en específica y a la profundidad del pozo, aunque este sea somero (menor a 5000 pies) que es donde se emplea este tipo de fluido. No obstante, se evidenció que estadísticamente los resultados indican que el mejor comportamiento es el del fluido de almidón de caña agría al no presentar diferencias significativas respecto al fluido patrón o comercial.

Lo señalado anteriormente resalta la importancia del estudio, porque tal como lo señala Santivañez-Huarcaya et al. (2019) “Los almidones de maíz y de papa son los que más vienen usándose, sin embargo, se sigue en la búsqueda de aditivos naturales que puedan reemplazar a los comerciales” (p.19). En este contexto, el almidón de caña agría (*Costus spicatus*) proviene de una planta que crece de manera natural y no es un producto alimenticio prioritario a nivel mundial, además tiene poco uso, bajo costo y fácil cultivo (Guedez et al., 2019). Asimismo, desde el punto de vista técnico y económico, para Aguirre-Mogollón et al. (2022) “Los fluidos de perforación poliméricos son uno de los productos más utilizados en la industria del petróleo, sin embargo, los aditivos usados para este fluido como el PAC-L y PAC-R elevan el costo de formulación” (p. 21).

4. CONCLUSIONES

Las propiedades funcionales de los almidones nativos en estudio satisfacen los requerimientos de la industria petrolera para ser empleados como agentes controladores de filtrado. Sin embargo, es posible que el valor de muchas de ellas se haya visto afectadas por el método aplicado para obtener el almidón. Al desarrollar los fluidos, estos mostraron un amplio rango en las propiedades en estudio, pero cumplen con los requerimientos de los sistemas base agua. Estadísticamente el fluido formulado con caña agría presentó un comportamiento similar al fluido con almidón comercial, sin embargo, no se pueden descartar los otros fluidos porque su uso depende de las condiciones operativas de perforación e igualmente en la formulación del fluido solo se modificó la concentración de los almidones manteniendo constante las demás concentraciones de los distintos aditivos.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

El autor declara que en el presente manuscrito asumió los siguientes roles: conceptualización de las ideas, desarrollo y diseño de la metodología aplicada; creación de modelos, aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales u otras técnicas formales para analizar o sintetizar datos de estudio, Redacción - Borrador Original, Redacción - Revisión y Edición del manuscrito final Preparación, creación o presentación del trabajo publicado por los miembros del grupo de investigación original, específicamente revisión crítica, comentario o revisión – incluyendo las etapas previas o posteriores a la publicación.

DECLARACIÓN DE INTERESES CONTRAPUESTOS

El autor afirma que no tiene relaciones personales conocidas ni intereses financieros en conflicto que pudieran haber influido en el trabajo que se presenta en este artículo.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos creados y/o analizados durante el presente estudio están disponibles para el autor a solicitud razonable.

AGRADECIMIENTOS

Ninguna agencia de financiamiento del sector público, comercial o sin fines de lucro financió este estudio en particular.

REFERENCIAS

Adewum, C., Achugasim, O., & Ogali, R. (2018). Physicochemical Characterization of Starch from *Unripe Artocarpus heterophyllus Lam* Pulp as a Low-Cost Starch Source for Oilfield Applications. The Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos: SPE.

Aguirre-Mogollón, A. O.-R., & Tovar- Moreno, J. A. (2022). Desempeño del almidón natural de plátano, en el control de propiedades físicas en un fluido de perforación polimérico a nivel de laboratorio. Fuentes: El reventón energético, 20(1), 21-30.

American Petroleum Institute [API]. (2005). Recommended practice for field testing water based fluids drilling fluids. Norma API RP 13B-1. Houston, EE.UU.

Anderson, R., Conway, H., & Peplinski, A. (1969). Gelatinization of corn grifts by roll and extrusion cooking. Cereal Science Today, 14, 4-12.

Aprianita, A., Purwandari, U., Watson, B., & Vasiljevic, T. (2009). Physico-chemical properties of flours and starches from selected comercial tubers available in Australia. International Food Research Journal, 16, 507-520.

Aristizabal, J., & Sánchez, T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization (FAO).

Ariza, E., & Fajardo, A. (2011). Factibilidad del uso de almidón de plátano como aditivo para lodos de perforación. Revista ION (23), 15-22.

Ariza, E., Castro, A., & Gómez, J. (2013). Factibilidad del uso del almidón de achira como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua. Revista ION, 26(1), 63-71.

Assis, A. H. (2018). Potato starch for enhancing the properties of the drilling fluids. Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 19(3), 33-40.

Bello, L., Contreras, S., Romero, R., Solorza, J., & Jiménez, A. (2002). Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca L.* (Var. Macho). Agrociencia, 36(2), 169-180.

Bou Rached, L., de Vizcarrondo, C., Rincón, A., & Padilla, F. (2006). Evaluación de harinas y almidones de mapuey (*Dioscorea trifida*), variedades blanco y morado. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 56(4), 375-383.

Busch, A., Myrseth, V., Khatibi, M., Skjetne, P., Hovda, S., & Johansen, S. (2018). Rheological characterization of polyanionic cellulose solutions with application to drilling fluids and cuttings transport modeling. Appl. Rheol, 2018.

Cescon, L. D., Quartarone, P., Ribeiro, S. P., & Nascimento, R. S. (2018). Cationic starch derivatives as reactive shale inhibitors for water-based drilling fluids. Journal of Applied Polymer Science, 135(33), 46621.

Chimbo, V. (2014). Evaluación de la actividad antiinflamatoria de extractos de las hojas de caña agria (*Costusspicatus*) en ratas (*Rattus norvegicus*) con edemas inducidas por carragenina. . Ecuador: Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Comisión Venezolana de Normas Industriales [COVENIN]. (1990). Auxiliares textiles. Almidón de maíz no modificado. Caracas: Fondonorma.

Dankwa, O. K., Appau, P. O., & Broni-Bediako, E. (2018 a). Evaluating the effects of monovalent and divalent salts on the rheological properties of water-based mud. The Open Petroleum Engineering Journal, 11(1), 98-106.

Dankwa, O. K., Appau, P. O., & Tampuri, M. (2018 a). Performance evaluation of local cassava starch flour as a secondary viscosifier and fluid loss agent in water-based drilling mud. Ghana Mining Journal, 18(2), 68-76.

Dankwa, O. K., Appau, P. O., & Tampuri, M. (2018 b). Performance evaluation of local cassava starch flour as a secondary viscosifier and fluid loss agent in water-based drilling mud. Ghana Mining Journal, 18(2), 68-76.

Dankwa, O. K., Appau, P. O., & Tampuri, M. (2018 b). Performance evaluation of local cassava starch flour as a secondary viscosifier and fluid loss agent in water-based drilling mud. Ghana Mining Journal, 18(2), 68-76.

Davoodi, S., Al-Shargabi, M., Wood, D. A., Minaev, K. M., & Rukavishnikov, V. S. (2023). Modified-starch applications as fluid-loss reducers in water-based drilling fluids: A review of recent advances. Journal of Cleaner Production, 140430.

Elkatatny, S. (2019). Enhancing the Rheological Properties of Water-Based Drilling Fluid. Using Micronized Starch. Arabian Journal for Science and Engineering, doi.org/10.1007/s13369-019-03720-1.

ESVENCA. (2010). Manual básico de fluidos de perforación. Maturín: S.E.

Ghazali, N. A., Alias, N. H., Mohd, T. A., Adeib, S. I., & Noorsuhana, M. Y. (2015). Potential of cornstarch as fluid loss control agent in drilling mud. Applied Mechanics and Materials, 754, 682-687.

Granados, C., Guzmán, L., Acevedo, D., Díaz, M., & Herrera, A. (2014). Propiedades funcionales del almidón de sagú (*Maranta arundinacea*). Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 12(2), 90-96.

- Granados, S., Guerra, Y., & Vega, R. (2019). almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado con ácido cítrico, como controlador de filtrado en fluidos base agua poliméricos. Maturín: Tesis de pregrado. Universidad de Oriente.
- Guedez, D., Romero, B., & Vega, R. (2019). Almidón de caña agria (*Costus spicatus*) como aditivo controlador de filtrado en fluidos base agua poliméricos. *Revista Ingenio Magno*, 10(1), 10-22.
- Hernández, M., Torruco, J., Chel, L., & Betancur, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 718-726.
- Jaramillo, L. (2013). Obtención de almidones modificados de achira (*Canna edulis ker*) y caracterización de sus propiedades de interés en la industria de alimentos. Cali: Tesis de Maestría. Universidad del Valle.
- Kelvin, V. K., & Dune, K. K. (2022). The Effect of Cassava Starch and Coconut Fibre on Rheological Properties and Fluid Loss Control of Water-Based Drilling Fluid. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 4(3), 742-749.
- Li, X., Jiang, G., He, Y., & Chen, G. (2021). Novel starch composite fluid loss additives and their applications in environmentally friendly water-based drilling fluids. *Energy & Fuels*, 35(3), 2506-2513.
- Lindeboom, N., Chang, P., & Tyler, R. (2004). Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch/Stärke*, 56(3-4), 89-99.
- Luo, Z., Pei, J., Wang, L., Yu, P., & Chen, Z. (2017). Influence of an ionic liquid on rheological and filtration properties of water based. *Appl. Clay Sci*, 136, 96-102.
- Meaño, N., & Castillo, M. (2019). Determinación de las propiedades físicas, químicas y funcionales del almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) modificado mediante un tratamiento alcohólico-alcalino. *Saber UDO*, 31, 98-109.
- Meaño, N., Ciarfella, A., & Dorta, A. (2014). Evaluación de las propiedades químicas Y funcionales del almidón nativo de ñame congo (*Dioscorea bulbifera L.*) para predecir sus posibles usos tecnológicos. *Saber UDO*, 26(2), 182-187.
- MI -SWACO. (2001). *Drilling fluids engineering manual*. Houston: S.E.
- Nasiri, A., Shahrabi, M. J., Nik, M. A., Heidari, H., & Valizadeh, M. (2018). Influence of monoethanolamine on thermal stability of starch in water-based drilling fluid system. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1), 167-171.
- Needaa, A. M., Pourafshary, P., Hamoud, A. H., & Jamil, A. B. (2016). Controlling bentonite-based drilling mud properties using sepiolite nanoparticles. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4), 717-723.
- Novriansyah, A. (2021). Experimental analysis of cassava starch as a fluid loss control agent on drilling mud. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1094-1098.
- Pacheco, E., & Techeira, N. (2009). Propiedades químicas y funcionales del almidón nativo y modificado de ñame (*Dioscorea alata*). *Interciencias*, 34(4), 200-205.

- Palomino, C., Molina, Y., & Pérez, E. (2010). Atributos físicos y composición química de harinas y almidones de los tubérculos de *Colocasia esculenta* (L.) Schott y *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott. *Rev. Fac. Agron. (UCV)*, 36(2), 58-66.
- Pérez, A., Rios, K., & Vega, R. (2015). Almidón de ocumo chino (*Colocasia esculenta*) como aditivo controlador de filtrado para fluidos de perforación base agua. Maturín: Tesis de pregrado. Universidad de Oriente.
- Pinzón, F., García, A., & Sánchez, A. (2013). Extracción y propiedades funcionales del almidón de yuca, *manihot esculenta*, variedad ICA, como materia prima para la elaboración de películas comestibles. *@limentech (Ciencia y Tecnología Alimentaria)*, 11(1), 13-21.
- Prieto, A. (2007). Tecnología de los fluidos de perforación. Manual técnico. Maracaibo, Zulia: Apoca.
- Ramos Aguirre, F., Chadrina, O., Freire Carrera, F., Guaquipana Paredes, J., & Romero Cortez, H. (2023). Control de filtrado de fluidos de perforación petrolero de bajo impacto ambiental mediante el uso de almidón de yuca. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 31(1), 1-10.
- Reyes, L., Pacheco, É., Garnica, A., Cueva, & Zapién, A. (2019). Obtención, separación y purificación de almidón a partir de *Colocasia esculenta* para su uso como excipiente en formas farmacéuticas. *Tequío*, 2(6), 35-44.
- Rivas, M., Méndez, G., Sánchez, M., Núñez, C., & Bello, L. (2008). Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica del almidón de plátano oxidado y lintnerizado. *Agrociencia*, 42(5), 2-3.
- Rivoli, L., & Pérez, E. (1996). Características fisicoquímicas y funcionales del almidón de maíz modificado químicamente. Formación de enlaces cruzados. *Tecnol. Alimen.*, 31(1), 4-9.
- Rodríguez, D. E., Caicedo, Y., Córdoba, Y., Baena, Y., & Mora, C. (2005). Caracterización de algunas propiedades fisicoquímicas y farmacotécnicas del almidón de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*). *Rev. Col. Cienc. Qui. Fram.*, 34(2), 140-146.
- Samán Tecnología Integral en Petróleo. (2013). Manual técnico de productos. Maturín: S.E.
- Sandhu, K., & Singh, N. (2007). Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chemistry*, 101(4), 1499-1507.
- Santivañez-Huarcaya, J., Cano-Tocas, W. E., Ordoñez-Ruiz, D., & Bohórquez Araque, A. d. (2019). Evaluación del uso de almidón de papa como aditivo para lodos de perforación. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 17(1), 19-28.
- Soto, D., León, O., Urdaneta, J., Muñoz-Bonilla, A., & Fernández-García, M. (2020). Modified starch as a filter controller in water-based drilling fluids. *Materials*, 13(12), 2794.
- Techeira, N., Sívoli, L., Perdomo, B., Ramírez, A., & Sosa, F. (2014). Caracterización fisicoquímica, funcional y nutricional de harinas crudas obtenidas a partir de diferentes variedades de yuca (*Manihot esculenta crantz*), batata (*Ipomoea batatas lam*) Y ñame (*Dioscorea alata*), cultivadas en Venezuela. *INTERCIECIA*, 39(3), 192-197.

Tejeda, L., Rivera, A., Rosales, J., Tejeda, L., & Tordecilla, E. (2011). Hidrólisis del almidón de yuca (*Manihot Sculenta*) y de ñame (*Dioscórrea rotundata*) para producir jarabes glucosados. Revista ReCiTeIA .

Teresén, E., Valenzuela, A., & Vega, R. (2017). Almidón de mapuey (*Dioscórrea trífida*) y ñame congo (*Dioscórrea bulbífera*) como agente controlador de filtrado para fluidos de perforación base agua polimérico. Maturín: Tesis de pregrado. Universidad de Oriente.

Vargas, G., Martínez, P., & Velezmoro, C. (2016). Propiedades funcionales de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y su modificación química por acetilación. Scientia Agropecuaria, 7(3), 223 – 230.

Wu, Y., You, F., Hou, S., & Zhou, S. (2023). Study of a novel cross-linked graft copolymer starch in water-based drilling fluid. Materials Research Express, 10(5), 055501.