

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA**



**“FRACCIONAMIENTO DE FÓSFORO EN UN SUELO ÁCIDO DE SABANA
INCUBADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA”**

**Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela, por la Br.
Sánchez Mérida, como
requisito para optar al título
de Licenciada en Química.**

Caracas, Noviembre, 2008.

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "FRACCIONAMIENTO DE FÓSFORO EN UN SUELO ÁCIDO DE SABANA INCUBADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA". Presentado por la Br. Mérida Teresa Sánchez Da Costa, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciada en Química.

Prof. Danilo López-Hernández
(Director)

Prof. Miguel Murillo
(Jurado)

Prof. Paulino Betancourt
(Jurado)

RESUMEN

El ecosistema representado por los suelos arenosos de sabana, ubicados en el este del país, poseen características muy particulares tales como rápido drenaje interno, pH ácido, moderada precipitación y con ello un lavado constante de los suelos, lo que trae como consecuencia la pérdida de macronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Uno de los elementos esenciales que se pierden es el fósforo (P), lo que produce una limitante en la fertilidad de estos suelos. Aunque se ha demostrado que las enmiendas orgánicas, así como las rocas fosfóricas mejoran las condiciones de los mismos, nuevas enmiendas se quieren incorporar al sistema de mejoramiento de la fertilidad del suelo.

En este trabajo se pretende investigar las llamadas emulsiones asfálticas y su influencia sobre el suelo, que si bien, aún no se conoce su estructura química (debido a su complejidad), se sabe que son de fácil obtención, (proviene del petróleo); y que da resultados favorables en cuanto a fenómenos físico-químicos y al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

Tomando en cuenta las abundantes interrogantes que se tienen acerca del efecto de las emulsiones sobre el suelo, se presenta este trabajo; en el cual se realiza un fraccionamiento secuencial de P a un suelo de sabana del estado Anzoátegui, proveniente del Hato Rancho Grande, que permite obtener resultados acerca del comportamiento del P sobre las distintas fracciones existentes en el suelo. Esto se evaluó para dos experimentos: uno, en el que se indaga el efecto de las emulsiones sobre las cantidades de P en el suelo (incubación 60 días) y otro, que permite conocer el mismo efecto, pero empleando como variante, la Roca Fosfórica (RF) (incubación 15 días).

Los resultados para el primer experimento, indican que la emulsión no tuvo efecto sobre las fracciones de P; mientras que en el segundo, si se observa movilidad de P en el suelo, inducido por la adición de la RF y de las emulsiones en conjunto. Por otra parte la fracción de P_{NaOH} fue la que más contribuyó al reservorio

de P orgánico total. Este último (P_{OT}) fue estimado por dos metodologías: Saunders and Williams y por Hedley et al. El primer método, aunque provocó una sobreestimación del P_O no presentó diferencias con respecto al segundo.

Además, los valores de MO para este suelo Ultisol fueron bajos y no hubo efecto alguno de las emulsiones sobre la misma. Cuando el valor de C fue relacionado con el valor de P_O se obtuvieron valores $C/P_O \leq 200$, lo que indicó procesos de mineralización en ambos experimentos, incrementándose la velocidad de los mismos, sólo cuando las emulsiones son añadidas a suelos con roca. Por último, se realizó el análisis de varianza **ANOVA** en el que se compararon los tratamientos de ambos experimentos y las diferentes metodologías empleadas.

DEDICATORIA
*A mis padres, Abuela y a ti,
donde quiera que estés....*

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque eres grande y todo lo puedes....

A mis padres por estar siempre conmigo en los momentos tristes y felices de mi tesis, y siempre.... Gracias por ser mi guía y mi fortaleza en todo momento... a ustedes les debo todo... los amo....

A mi abuelo, desde donde quiera que estés, este era nuestro sueño, aquí esta es para ti...

A mi Abuela, maravillosa madre, increíble amiga y con mucho amor para dar... a ti abuela te amo por sobre todas las cosas, gracias por siempre estar...

A mi hermano por alegrarme siempre y ayudarme también... gracias hermanito...

A mi tía, por siempre darme fuerzas, gran amiga y concejera... a mi tío por siempre ser mí ejemplo a seguir y a ti prima, que aunque estás lejos... gracias...

Mi especial agradecimiento a mis tutores, forjadores de camino, con todas sus orientaciones para que esta tesis pudiera llegar a su entrega final:

A ti, profesor Danilo por ser el bastón de mi tesis, por ser mi guía fundamental, académicamente hablando, y por siempre estar en los momentos que más te necesite. Personas como usted no se pueden dejar de admirar... gracias.

Al profesor Alonso Ojeda, me enseñaste muchas cosas que difícilmente olvidare... gracias además, por abrirme la puertas en el momento en el que otra me cerraban.

Al profesor William Meléndez, por ser una gran persona y por siempre darme la mano en los momentos en los que más la necesite. Es usted una persona muy noble... gracias infinitas...

A Carlos (Carlitos) Barrios y Luis Vílchez, por su colaboración constante y por su amistad...son lo mejor de verdad... gracias, lo mejor para ustedes.

Al profesor Jimmy Castillo por su colaboración y su gran ayuda en la realización de mi tesis... gracias

A ti Edgard Flores, un ser muy especial que, con su paciencia y dedicación, representó un gran apoyo incondicional, GRACIAS por haber estado conmigo en las buenas y en las malas...

A ti, Nancy, querida amiga, gracias por todas la veces que me escuchaste y por tu apoyo en todo momento. Gracias amiga... y a ti Desi, que aunque lejos, has estado conmigo siempre...

A ti Marcos, por tu ayuda incondicional, sin importar horas... a Magella Rangel del IVIC, al señor Arturo, por su colaboración sin medida, a Fernanda Morales y Livia Agüero por ser las guías iniciadoras de mi tesis, a Ives por tu paciencia y a ti Jorge Barreto por ser amigo, te deseo lo mejor.

Y a todos los que no menciono, pero que contribuyeron en la realización de este trabajo..... GRACIAS.

INDICE GENERAL

	PAG.
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	X
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE GRÁFICOS	XI
INDICE DE ANEXOS	XII
SIMBOLOGIA	XIV
INTRODUCCIÓN	1
FUNDAMENTOS TEORICOS Y ANTECEDENTES	5
1.1 El Suelo	6
1.1.1 Suelos ácidos de sabana	7
1.2 El fósforo	8
1.2.1 Ciclo del fósforo	8
1.2.2 Formas del fósforo	10
1.2.3 Papel de la materia orgánica del suelo	14
1.2.4 Dinámica del fósforo y principales reacciones	19
1.3 Cantidad de carbono en los suelo. Relación C/N y C/P	24
1.4 Enmiendas orgánicas	27
1.5 Emulsiones asfálticas	28
1.6 Fraccionamiento químico de fósforo	32
1.7 Antecedentes	35
1.7.1 Enmiendas orgánicas	35
1.7.2 Emulsiones asfálticas	44
OBJETIVOS	48
PARTE EXPERIMENTAL	49
2.1 Zona de estudio	49
2.1.1 Ubicación Geográfica	49
2.1.2 Clima	50
2.1.3 Geología	50

2.1.4	Suelos	51
2.1.5	Vegetación	51
2.2	Metodología Experimental	52
2.2.1	En Campo	52
2.2.1.1	Distribución de parcelas	52
2.2.1.2	Muestreo	52
2.2.2	En el Laboratorio	54
2.2.2.1	Características de las emulsiones asfálticas	54
2.2.2.2	Diseño Experimental	54
2.2.2.3	Pre-tratamiento de muestra y métodos de análisis	55
2.2.3	Tratamiento Estadístico	61
	RESULTADOS Y DISCUSIONES	62
3.1	Caracterización del suelo ultisol estudiado	63
3.2	Fraccionamiento de P	64
3.3	Fosforo Orgánico	70
3.4	Contenido de materia orgánica en cada tratamiento	73
3.5	Relación C/P _o	74
3.6	Efecto de las emulsiones sobre la fracción de P _o	76
	CONCLUSIONES	80
	RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	90

INDICE DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Ciclo del fósforo en el suelo	9
Figura 2. Reacciones en las que intervienen los fosfatos en el sistema suelo-planta	11
Figura 3. Estructura del hexafosfato de inositol	13
Figura 4. Esquema de la materia orgánica en el suelo	16
Figura 5. Esquema-resumen del fraccionamiento de las sustancias Húmicas de la materia orgánica del suelo	18
Figura 6. División política del estado Anzoátegui	49
Figura 7. Distribución espacial del muestreo de campo	53
Figura 8. Monolito de 15cm. de profundidad y 6 cm. De ancho aproximadamente	53
Figura 9. Metodología de fraccionamiento de fósforo de Hedley (1982) modificada por Ojeda y López-Hernández (1994)	57
Figura 10. Esquema experimental para la determinación de carbono	61

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de Po (ppm) reportados por distintos autores (Incluye el estimado en este trabajo)	71
---	----

INDICE TABLAS

	PAG.
Tabla 1. Resumen de diversos trabajos realizados en suelos ácidos de sabanas a nivel nacional	36
Tabla 2. Diseño Experimental	55
Tabla 3. Caracterización inicial del suelo	63
Tabla 4. Fraccionamiento secuencial de P para el experimento 1	66
Tabla 5. Fraccionamiento secuencial de P para el experimento 2	69
Tabla 6. Estimación del P_o para el experimento 1 por ambas metodologías	71
Tabla 7. Estimación del P_o para el experimento 2 por ambas metodologías	72
Tabla 8. Contenido de materia orgánica para los suelos tratados	73
Tabla 9. Relación C/ P_o para los tratamientos del experimento 1	75
Tabla 10. Relación C/ P_o para los tratamientos del experimento 2	76
Tabla 11. Tabla correspondiente al gráfico 1	78
Tabla 12. Tabla correspondiente al gráfico 2	78

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfico representando los valores de % P_o/P_t para el experimento 1	77
Gráfico 2. Gráfico representando los valores de % P_o/P_t para el experimento 2	79

INDICE DE ANEXOS

		PAG.
Anexo 1 y 2.	Monolitos iniciales y balanza utilizada para el control de humedad (60 % CC)	91
Anexo 3.	Secado de muestras luego del tiempo de incubación	91
Anexo 4.	Muestras incubadas con emulsión y RF	92
Anexo 5 y 6.	Extracto de Bicarbonato y la materia orgánica precipitada por floculación	92
Anexo 7.	Curva de Calibración más baja (0.01-0.05 ppm de P)	92
Anexo 8.	Muestras con ignición para determinar Pt por Saunders y Williams modificado	93
Anexo 9.	Curva de calibración de C	93
Anexo 10 y 11.	Coloraciones de las muestras para medir carbono	93
Anexo 12 y 13.	Tres réplicas de una muestra y muestras de carbono enrasadas para medir	94
Anexo 14.	Calibración de las resinas iónicas utilizadas	94
Anexo 15.	Determinación de P en la RF	95
Anexo 16.	Análisis de varianzas del experimento 1, con un $p < 0,05$	96
Anexo 17.	Método Duncan para el extracto P resina del experimento 1	96
Anexo 18.	Método Duncan para el extracto P_{Bi} del experimento 1	96
Anexo 19.	Método Duncan para el extracto P microbiano del experimento 1	97
Anexo 20.	Método Duncan para el extracto P_{NaOH} del experimento 1	97
Anexo 21.	Método Duncan para el extracto P_{HCl} del experimento 1	97
Anexo 22.	Análisis de varianzas del experimento 2, con un $p < 0,05$	98
Anexo 23.	Método Duncan para el extracto P resina del experimento 2	98
Anexo 24.	Método Duncan para el extracto P_{Bi} del experimento 2	99

Anexo 25.	Método Duncan para el extracto P_{NaOH} del experimento 2	99
Anexo 26.	Método Duncan para el extracto P_{NaOHs} del experimento 2	99
Anexo 27.	Método Duncan para el extracto P_{HCl} del experimento 2	99

SIMBOLOGÍA

P	Fósforo
P_o	Fósforo orgánico.
P_i	Fósforo inorgánico
P_t	Fósforo total
P_{disp}	Fósforo disponible
P_{ads}	Fósforo adsorbido
P_{resi}	Fracción de fósforo extraído con resina
P_{NaHCO3}	Fracción de fósforo extraído con bicarbonato
P_{CHCl3}	Fracción de fósforo fumigado con cloroformo
P_{NaOH}	Fracción de fósforo extraído con NaOH
P_{sonic}	Fracción de fósforo sonificado
P_{HCl}	Fracción de fósforo extraído con HCl
P_{res}	Fósforo residual.
EA	Emulsión Aniónica
EC	Emulsión Catiónica
g	gramos
kg	kilogramos
µg	microgramos
Ha	Hectáreas
mL	mililitros
mm	milímetros
t	Toneladas
C/P_o	Relación Carbono/ Fósforo orgánico
°C	grados Celsius
CV	Coeficiente de variación
m	metros

INTRODUCCIÓN

En Venezuela, cerca de la tercera parte del territorio nacional se asocia a una región fisiográfica con predominio de ecosistemas de sabana. Los suelos de sabanas provienen de formaciones geológicas muy antiguas que han sido sometidas a intensos procesos de meteorización, causados por las abundantes lluvias y elevadas temperaturas ambientales lo que ha conducido a la formación de suelos de pH bajos, de drenaje interno rápido con escasa capacidad de intercambio catiónico y constituidos principalmente por arenas; lo que induce a una baja fertilidad y productividad en estos ecosistemas ^[1]. A las condiciones naturales de estos suelos se suman las prácticas de una agricultura intensiva en las sabanas de Los Llanos Orientales de Venezuela debido a la explotación de la faja petrolífera del Orinoco, la cual ha dejado a través de los años un incremento de la producción de alimentos como resultado del aumento poblacional en estas zonas ^[2].

La relativa abundancia de lluvia en los suelos de sabana (1200 a 2000 mm.) favorece el lavado de los suelos y con ello, la pérdida de elementos esenciales ^[3]. Una alta proporción de estos suelos son deficientes en fósforo, de allí que este elemento se ha identificado con frecuencia, como el principal limitante de la producción primaria y secundaria de estos ecosistemas ^[4]. Con la posible excepción del nitrógeno, ningún otro macro-nutriente es tan decisivo para el crecimiento de las plantas, como lo es el fósforo.

El fósforo se presenta en los suelos tanto en formas orgánicas, ligadas a la materia orgánica como en formas inorgánicas, manera como la absorben las plantas. La solubilidad de estas formas y por tanto su disponibilidad para las plantas está condicionada por reacciones fisicoquímicas y biológicas, que a su vez afectan la productividad de los suelos. Las transformaciones del fósforo (P) entre formas

orgánicas e inorgánicas están estrechamente relacionadas, dado que el fósforo inorgánico (Pi) es una fuente para los microorganismos y las plantas, y el fósforo orgánico (Po) al mineralizarse repone el fósforo en solución ^[5]. El conocimiento de las formas químicas específicas de los fosfatos es importante en el entendimiento de la química del P en los suelos, así como la génesis y fertilidad de los mismos. En suelos ácidos, el P forma compuestos insolubles con hierro y aluminio (como es el caso); mientras que bajo condiciones alcalinas, se forman compuestos de calcio. Estos compuestos dependen de las propiedades del suelo, encontrándose que su solubilidad y estabilidad afectan la disponibilidad de P en el mismo ^[6].

La fracción orgánica –que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos y sustancias producidas por estos ^[7]– tiene especial importancia pues regula los procesos químicos que allí ocurren, como por ejemplo, el suministro de elementos nutritivos, productos de la mineralización (como N, P, S, etc.) y la contribución a la capacidad de intercambio catiónico de los suelos. Además, influye sobre las características físicas (estructura, formación de agregados, uso más eficiente del agua) y es el centro de casi todas las actividades biológicas del suelo, incluyendo la microflora, la fauna y hasta el sistema de raíces de plantas superiores, ya que es la fuente energética de ellos por sus compuestos de carbono ^[8].

Como consecuencia de todo lo expuesto anteriormente, esta baja fertilidad natural ha restringido el desarrollo de la agricultura en los suelos de sabana, ya que para obtener rendimientos apropiados (aún de cultivos poco exigentes), es necesaria la aplicación de dosis significativas de fertilizantes inorgánicos, que además de presentar altísimos costos, degradan el ambiente y no ofrecen garantías de resolver el problema. Es por ello que a lo largo de los últimos años se ha implementado la aplicación de enmiendas orgánicas ^[4] y de emulsiones asfálticas que permiten un mejor desarrollo de los cultivos. En el caso del uso de emulsiones asfálticas sobre la

superficie del suelo, después de la siembra, se ha demostrado en numerosas pruebas de laboratorio, invernadero y de campo, su efectividad para regular el régimen hídrico de los suelos, reduciendo en forma marcada los inconvenientes durante la estación de crecimiento, especialmente al inicio, cuando períodos alternados de excesos y déficit de agua afectan desfavorablemente a las plantas. Estas emulsiones estabilizan los agregados superficiales del suelo frente al impacto de las gotas de lluvia impidiendo el sellado y favoreciendo la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo, lo que reduce las pérdidas de agua por evaporación en la superficie del suelo, contribuyendo a su conservación para fines del cultivo. Como beneficios colaterales, están la reducción de problemas de erosión en terrenos inclinados y la prevención de formación de costras que afecten la emergencia de las plántulas ^[9]. Además se destaca que el rendimiento del cultivo (expresado en T/Ha) en un suelo tratado con asfalto duplica el rendimiento del cultivo del suelo sin tratar ^[2].

Por lo tanto las perspectivas de utilización futura de esta práctica en forma extensiva son favorables debido a: a) Disponibilidad del producto básico en cantidades ilimitadas a costos razonables en el país, b) Necesidad de incrementar y regularizar la producción de alimentos en Los Llanos Venezolanos y a nivel nacional para reducir la dependencia del exterior, y c) Bajos requerimientos de inversión y mano de obra ^[9].

Finalmente, para contribuir a la iniciativa de: responder a la necesidad de alcanzar un ritmo de explotación sostenible, que involucre el manejo productivo de los recursos de la agricultura para satisfacer las necesidades humanas de Los Llanos Orientales; y que además, garantice una producción agrícola rentable, se desarrollaran, en este trabajo aspectos concernientes a las interacciones positivas que permitan vincular este tipo de manejo con la modificación cualitativa y cuantitativa de los contenidos de materia orgánica del suelo y en consecuencia tal

práctica de manejo induzca diferencias entre las distintas formas y fracciones de P, en particular las más disponibles de este elemento. Se determinarán además, los distintas etapas de movilización e inmovilización del P en el suelo para permitir explicar junto a la información de las fracciones obtenidas, la dinámica o ciclaje del P.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES

1.1 EL SUELO

El suelo es definido como un sistema de tres fases: sólido, líquido y gaseoso. Los componentes del suelo varían en proporción, pero en condiciones ideales guardan una relación en base a volumen, de fase sólida 50 % y fase no sólida 50 %^[6]. La fase sólida está compuesta por material orgánico e inorgánico. El material orgánico está compuesto por materia orgánica viva (organismos del suelo y raíces de plantas) y materia orgánica muerta. El material inorgánico, por su parte, está distribuido en partículas de diferentes tamaños con propiedades físico-químicas variables. Los términos adecuados para definir estos tamaños de partículas son arena, limo y arcilla, los cuales son determinados en función del diámetro de las partículas minerales del suelo. Las arenas tienen un diámetro entre 2000 y 50 μm , el limo entre 50 y 2 μm y las arcillas con diámetros inferiores a 2 μm .^[10]

Los diferentes tipos de clases texturales de tamaños de partículas, aportan ciertas propiedades a los suelos. Ejemplo de ello son las arcillas que gracias a la alta área superficial en sus partículas, incrementan la capacidad de los suelos para retener el agua y los nutrientes esenciales. Las arcillas le otorgan a los suelos baja permeabilidad, lo que reduce en gran medida las pérdidas de nutrientes por lavado, contrario a los suelos arenosos. Estos últimos, por su parte, sirven de soporte al sistema radical de las plantas y ayudan al suelo a ser más permeable y aireado.^[10]

En la mayoría de los suelos, las fracciones arena y limo consisten principalmente de minerales primarios, formados a altas temperaturas y heredados de rocas ígneas y metamórficas. Los minerales primarios más abundantes son cuarzo y feldespato. La fracción arcilla de los suelos está constituida primordialmente por minerales secundarios, formados por reacciones a bajas temperaturas, heredados de rocas sedimentarias o formadas directamente por meteorización. Los

minerales secundarios más comunes en los suelos, incluyen carbonatos, sulfatos, sulfuros, arcillas silicatadas y varios óxidos. En la fracción fina, los óxidos de cationes tales como Al, Fe, Mn y Ti, se forman cuando el suelo es lavado, lo que trae como consecuencia que los coloides del suelo se enriquezcan de estos cationes. ^[6]

1.1.1 SUELOS ACIDOS DE SABANA

En todas las regiones donde la precipitación es alta la acidez del suelo es muy común. Estas precipitaciones provocan lixiviación de apreciables cantidades de bases intercambiables de los niveles superficiales de los suelos.

Uno de los efectos más importantes del pH de los suelos, en especial los ácidos, está relacionado con la nutrición mineral de las plantas. La absorción de elementos nutritivos ocurre principalmente en el rango de pH correspondiente a los suelos neutros (6-7). Elementos como el N, S, P, K, Ca y Mg son típicos ejemplos de esta situación haciéndose menos disponibles cuando los suelos son más ácidos. Otros elementos nutritivos esenciales para las plantas, pero requeridos en menores cantidades que los mencionados anteriormente son: Fe, Mn, B, Cu y Zn, cuyas solubilidades tiende a aumentar en la solución del suelo a pH ácido, lo cual puede llegar a convertirse en tóxico para las plantas ^[10].

La menor aprovechabilidad de un nutrimento en el suelo generalmente está asociada con reacciones químicas, que culminan con la formación de compuestos no absorbidos por el sistema radical de las plantas, que muchas veces se hace evidente a través de síntomas característicos en hojas y frutos ^[10].

1.2 EL FÓSFORO

El fósforo (P) es un elemento esencial para plantas y animales, siendo el doceavo en abundancia en la corteza terrestre. Comúnmente se presenta como un sólido incoloro, semitransparente y blando. Este no metal es insoluble en agua, y se oxida espontáneamente en presencia de aire formando pentóxido de fósforo, por lo que se almacena sumergido en agua.

Es un elemento esencialmente covalente, por lo que forma diversos enlaces con otros elementos de la naturaleza. Se presenta en su estado natural como ortofosfatos minerales, particularmente como fluorapatita. El contenido medio total de fósforo de la litosfera es de 0,28 % expresando como P_2O_5 , pero muchos suelos superficiales contienen de 0,022 a 0,083 % de fósforo. El fósforo no se encuentra libre en la naturaleza (excepto en algunos meteoritos) por lo que está distribuido en compuestos intrínsecos de rocas, minerales, plantas y animales.

El fósforo (P) es uno de los nutrientes primarios o macronutrientes para las plantas, llamados así porque se requieren en altas cantidades para el completo desarrollo de los vegetales. Se le puede encontrar en todas las células de las plantas. El P se encuentra en la mayoría de las plantas en concentraciones entre 0,1 a 0,4 %. Es absorbido en forma iónica como $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} (ortofosfatos). La absorción del P en forma de HPO_4^{2-} es mayor en suelos con valores de pH bajos, mientras que la absorción del ión $H_2PO_4^-$ es mayor en suelos con valores de pH altos en el suelo. ^[11]

1.2.1 CICLO DEL FOSFORO

Para comprender mejor los distintos procesos que se dan en el suelo y como ocurren las transformaciones en este, se presenta en la Figura 1 el ciclo del fósforo.



Figura 1. Ciclo del fósforo en un suelo. [11]

Se puede observar que se pierde fósforo por: escurrimiento, erosión, lavado y extracción en las cosechas. Por otro lado el fósforo ingresa al suelo por medio de adición de fertilizantes minerales (que es la más importante y significativa desde el punto de vista agronómico), retorno de residuos de animales y plantas y por deposición atmosférica.

Las plantas absorben únicamente el fósforo que está en la solución del suelo en forma de HPO_4^{2-} (ión fosfato monoácido) y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ (ión fosfato diácido). Cualquier fertilizante ya sea de origen orgánico o mineral debe de transformarse primero en esas especies (formas químicas) antes de ser utilizado por el cultivo. Las diferencias entre los residuos orgánicos y los fertilizantes minerales son principalmente dos: 1) velocidad de disponibilidad para el cultivo (los residuos orgánicos tienen que ser primero descompuestos por los microbios, mientras que los abonos minerales, por lo general, ya tienen los compuestos en la forma que la planta

los utiliza) y 2) concentración (los residuos orgánicos tienen concentraciones mas bajas de fósforo que los compuestos minerales).

Para garantizar una producción rentable y devolver al suelo el fósforo que ha sido extraído por la cosecha, los agricultores deben aplicar fósforo a sus cultivos. Es esta la forma de asegurar la fertilidad y la calidad del recurso suelo.

1.2.2 FORMAS DEL FOSFORO

Se han definido principalmente dos grandes formas de fósforo: Las formas inorgánicas y las formas orgánicas. Las formas inorgánicas de fósforo, provienen de los minerales del suelo, mientras que las orgánicas se presentan como fosfolípidos, ácidos nucleicos y fosfatos de inositol.

➤ Formas Inorgánicas de Fósforo

El fósforo inorgánico posee menor solubilidad que los compuestos fosfatados orgánicos y su abundancia es de acuerdo al origen del suelo donde provienen, a los niveles de materia orgánica y al pH. En principio se establecen tres grandes subdivisiones para esta categoría o tipo de fosfato, las cuales son:

- Formas discretas de fosfatos precipitados sobre superficies, las cuales son más fácilmente aprovechables.
- Partículas discretas de fosfatos ligeramente aprovechables.
- Fosfatos ocluidos, los cuales no son muy aprovechables y consisten en fosfatos ocluidos en carbonatos y óxidos.

Estos fosfatos interactúan en un sistema dinámico-heterogéneo que envuelve las raíces de las plantas, la solución y la fase sólida del suelo. Bajo, condiciones de

crecimiento vegetal activo, la tendencia de los iones fosfatos es a difundir hacia las raíces de las plantas y ser absorbidos por ellas; una vez que la solución del suelo es agotada en fosfatos, desde la fase sólida es liberada cierta proporción del fosfato superficial a través de un proceso de desorción, en el cual intervienen aniones orgánicos e inorgánicos comúnmente asociados al ambiente de raíces; de la misma manera, la descomposición (mineralización) de la materia orgánica enriquece en fosfatos la solución del suelo. Si el nivel de fosfatos en solución se incrementa por ejemplo, mediante adición de fertilizantes solubles en agua, la adsorción de estos fosfatos sobre la superficie del suelo o su precipitación como compuestos relativamente insolubles serán los procesos que dominarán los equilibrios de fosfatos. Figura 2. [12]

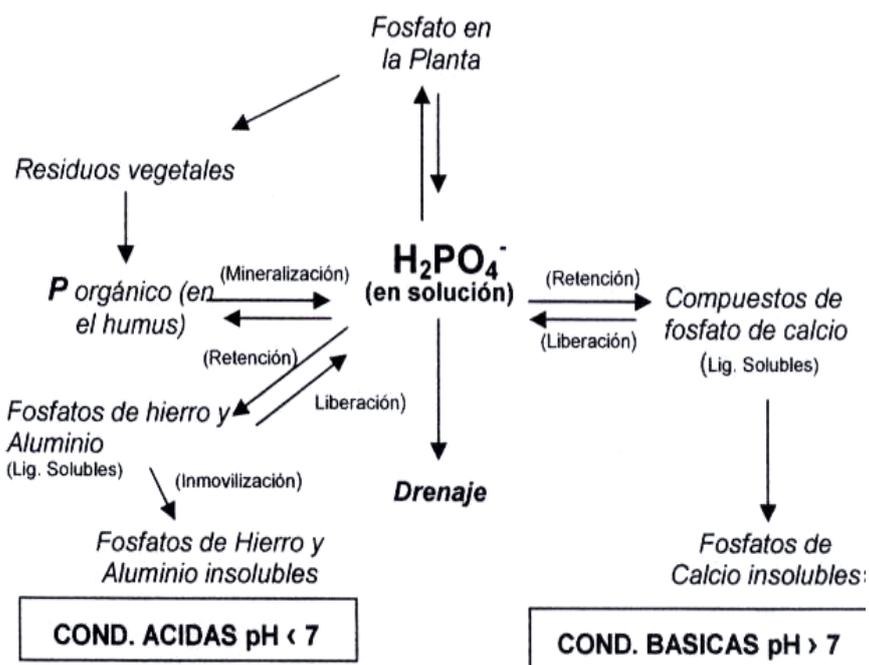


Figura 2. Reacciones en las que intervienen los fosfatos en el sistema suelo-planta.

La Figura 2 muestra que, de acuerdo con el pH, la retención de fosfatos ocurre con formación de diferentes compuestos. En condiciones ácidas, los productos finales son compuestos insolubles de hierro y aluminio, mientras que en suelos calcáreos los compuestos insolubles de fosfatos de calcio ocurren con mayor probabilidad. ^[12]

Algunas pérdidas de fosfatos en el sistema pueden ocurrir por drenaje de la humedad del suelo, pero en vista de la poca concentración de fosfato que presentan las soluciones del suelo, la magnitud de ésta pérdida por drenaje es pequeña, excepto para aquellos suelos con una baja capacidad de adsorción de fosfatos, ^[12] tales como los suelos de sabana en estudio, al sur del estado Anzoátegui, que son suelos arenosos que poseen un pH ácido y bajos contenidos de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na), lo que disminuye drásticamente la fertilidad en esta zona.

➤ Formas Orgánicas de fósforo

Los fosfatos orgánicos representan una proporción variable del fósforo total, el cual va desde el 2,6 % al 75 %, pudiendo alcanzar hasta un 80 %. Los compuestos de fosfato orgánico más comúnmente encontrados en los suelos, son los fosfatos de inositol, los ácidos nucleicos y los fosfolípidos. La sal de myo-inositol hexafosfato (ácido fítico) es uno de los constituyentes más comunes de la materia orgánica proveniente de las plantas. El ácido fítico es una sustancia muy estable y es relativamente soluble en agua. La insolubilidad de esta sal, cuando forma compuesto con el hierro, se usa para distinguir el hexafosfato de inositol (IHP) de otros esteres-fosfatos y ortofosfatos y es la base de muchas estimaciones en extractos de plantas. Este ester es sumamente estable cuando se le añaden bases fuertes, pero es gradualmente hidrolizado en soluciones ácidas ^[8]. Su estructura se muestra en la Figura 3.

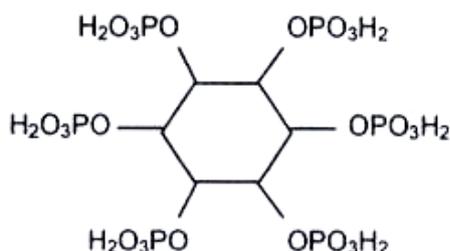


Figura 3. Estructura del hexafosfato de inositol. ^[8]

Este compuesto es un anillo de seis carbonos, cada uno unido a un grupo fosfato. Cuando se establece el enlace ester, cada grupo fosfato permanece con 2 grupos hidrógenos potencialmente reemplazables. Se ha sugerido, que esta estructura puede formar sales con iones de elementos comúnmente encontrados en los suelos, tales como el hierro, aluminio, calcio y magnesio. ^[12]

Con respecto a los ácidos nucleicos, es probable que aporten solamente una pequeña fracción del fósforo orgánico, el cual no excede del 2 % de la fracción orgánica total. La explicación más razonable a este hecho es que estos ácidos se mineralizan fácilmente y por tanto duran mucho menos tiempo en el suelo que los derivados estables del ácido fítico. Los lípidos, por su parte, son un grupo muy heterogéneo de sustancias y sus derivados fosforados, los fosfolípidos, también comprenden compuestos diferentes. Sin embargo, la fracción del fósforo orgánico en el suelo en este tipo de compuesto es muy pequeña, $\leq 1\%$. ^[8]

La degradación del material muerto proveniente de animales y plantas en los suelos, es un proceso biológico fundamental, porque el carbono (C) es recirculado como dióxido de carbono (CO_2), el nitrógeno (N) es transformado en amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), y otros elementos asociados como el fósforo, azufre y otros micronutrientes son transformados a formas inorgánicas, que son las requeridas por

las plantas. En este proceso, parte de los nutrientes es asimilado por microorganismos e incorporados a la biomasa microbiana. La conversión de C, N, P y S a formas minerales es llamada mineralización; por otra parte, la asimilación por síntesis de células microbianas y otros organismos es llamada inmovilización. ^[13]

Estos últimos procesos son dependientes y afectados por la naturaleza del suelo, la humedad, aireación, el pH y la temperatura del ambiente. También son dependientes de la relación C/P existente en la materia orgánica en descomposición. Los fosfatos recién precipitados (amorfos) pueden ser transformados en formas insolubles mediante un proceso de inmovilización, la cual implica una mayor cristalinidad de los compuestos fosfatados. Por lo expuesto anteriormente, la materia orgánica debe ser primeramente mineralizada, a fin de generar iones inorgánicos (H_2PO_4^-) a la solución del suelo, que es la forma como la planta puede aprovechar mejor el fósforo. ^[12].

1.2.3 PAPEL DE LA MATERIA ORGANICA DEL SUELO

La materia orgánica es aquella que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo ^[14]. Se encuentra constituida por: la fracción gruesa (residuos de plantas y animales), el humus (residuos resistentes a la degradación más productos sintetizados por los microorganismos) y la biomasa activa (organismos del suelo más raíces de plantas).

La fracción orgánica del suelo regula los procesos químicos, influye sobre las características físicas y es el centro de casi todas las actividades biológicas en el

mismo. Los efectos que puede generar la materia orgánica sobre estas propiedades, se presentan a continuación:

1) Procesos químicos en los que la materia orgánica interviene:

- El suministro de elementos por medio de la mineralización, en particular la liberación de N, P, S y micronutrientes disponibles para las plantas.
- La estabilidad de la acidez del suelo por su poder amortiguador.
- La apreciable contribución a la capacidad de cambio catiónico de los suelos, muy valiosa para los de textura arenosa.
- La volatilización de S y N de los suelos, sobre todo procedentes de la materia orgánica que se descompone fácilmente.
- Los fenómenos de absorción, entre los que son de particular importancia la inactivación de plaguicidas y la fijación del fósforo.

2) Propiedades físicas que la materia orgánica afecta:

- Favorece la formación de agregados individuales, reduce la agregación global del suelo y disminuye la plasticidad del mismo.
- Uso más eficiente del agua, lo que debe a una serie de fenómenos promovidos por la presencia de la materia orgánica, sobretodo en suelos de textura gruesa.

3) Propiedades biológicas en las que la materia orgánica es fuente:

- De nutrimentos tanto para los organismos superiores como para los inferiores, por sus compuestos de carbono.

Mediante reactivos alcalinos como el NaOH, se separan las huminas (que son insolubles) de los ácidos fúlvicos y húmicos (que son solubles). Estos últimos se separan mediante tratamiento ácido, generalmente HCl ó H₂SO₄. Los ácidos fúlvicos son solubles en ácidos fuertes, mientras que los húmicos son insolubles. Este comportamiento permite hacer separaciones ácido-base, de corte sencillo y rápido.

Entre las características comunes de las sustancias Húmicas se destacan:

- ❑ Sustancias amorfas de colores oscuros.
- ❑ Polímeros tridimensionales de elevado peso molecular.
- ❑ De carácter ácido, constituido por grupos funcionales variables:
 - *Núcleo*: grupos aromáticos nitrogenados (ejemplo: pirrol); grupos bencénicos aromáticos (ejemplo: naftaleno)
 - *Grupos reactivos*: responsables de importantes propiedades de la materia orgánica, ejemplo: hidroxilos, carbonilos, aminos, etc.
 - *Puentes de Unión*: nitrilos, aminos, cetónicos y cadenas alifáticas.

Acidos Húmicos: Se presentan como sólidos amorfos de color marrón oscuro, generalmente insolubles en agua y en casi todos los disolventes no polares, pero fácilmente dispersables en hidróxidos y sales básicas de los metales alcalinos, constituyendo un hidrosol que puede experimentar floculación mediante tratamiento de ácidos y demás cationes. Su molécula parece estar constituida por un núcleo de naturaleza aromática con mayor predominio de radicales alifáticos, presentando en conjunto el carácter de heteropolímero condensado.

Acidos Fúlvicos: Constituyen una serie de compuestos sólidos y semi-sólidos, amorfos, de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersable en agua y no precipitados por ácidos, susceptibles en cambio, a experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentraciones de soluciones de cationes no alcalinos.

Huminas: Constituyen un grupo de sustancias relativamente diferentes entre sí, cuyo origen se estima que provenga de herencia. Estas últimas son comparables con los ácidos húmicos y fúlvicos, pero están muy ligadas a la fracción mineral por medio de enlaces que solo pueden ser destruidos en el laboratorio por medio de agentes químicos (que rompen la unión con silicatos, por ejemplo). Al final del tratamiento se obtiene un residuo que se denomina humina, residuo no extraíble.

Humificación: Es el proceso de formación del humus, es decir, conjunto de procesos responsables de la transformación de la materia orgánica. Esta transformación puede llegar a la destrucción total de los compuestos orgánicos dando lugar a productos inorgánicos sencillos (producto de mineralización: CO_2 , NH_3 , H_2O , etc.)

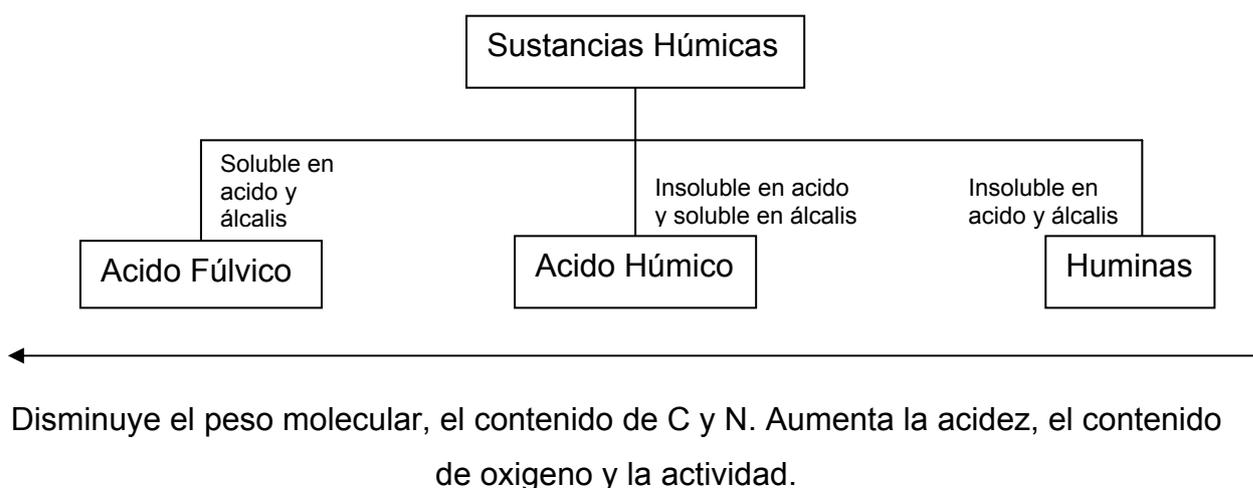


Figura 5. Esquema-resumen del fraccionamiento de las sustancias húmicas de la materia orgánica del suelo ^[6].

Los componentes elementales de los ácidos húmicos y fúlvicos, se estudian generalmente, por ser grupos muy activos en cuanto a su estructura química a pesar

de ser diferentes entre sí. Por otra parte, las huminas no son muy reactivas debido a la predominancia de la estructura aromática formada por C y H, principalmente. En general, los ácidos fúlvicos tienen mayor contenido de oxígeno, acidez total y grupos funcionales que los ácidos húmicos y éstos a su vez, tienen mayor contenido de carbono y nitrógeno que los ácidos fúlvicos. El contenido de acidez total y grupos funcionales origina mayor actividad. En consecuencia, los ácidos fúlvicos son de mayor actividad que los ácidos húmicos. Para distinguir entre ácidos húmicos y fúlvicos se toma en cuenta el peso molecular, cantidad de grupos funcionales, radicales y acidez ^[6].

La importancia de la materia orgánica ha sido expuesta anteriormente, así como también el hecho de que ella deba ser mineralizada primeramente para generar iones inorgánicos H_2PO_4^- , (forma como la planta absorbe el P), los cuales se encuentran en el suelo tanto en equilibrio con ciertas especies (según el pH del medio) como reaccionando químicamente.

1.2.4 DINAMICA DEL FOSFORO Y PRINCIPALES REACCIONES

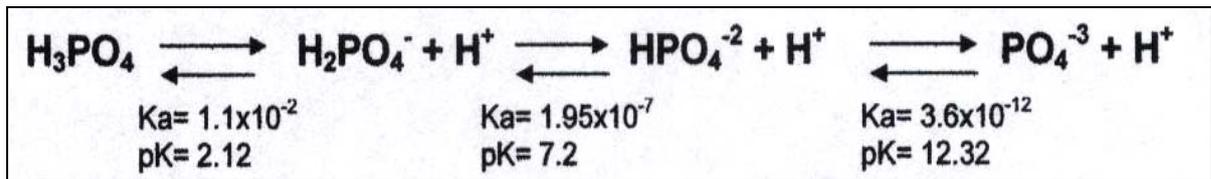
Los equilibrios de reacción entre las distintas formas de fósforo, dependen de los coloides y minerales presentes en el suelo, además del pH, la actividad microbiológica, la presencia de enzimas y ácidos orgánicos y la intensidad de la demanda de nutrientes. ^[16]

Por su parte, los coloides son sustancias formadas por partículas cuyas dimensiones son aproximadamente de 1 a 1000nm, las cuales permanecen suspendidas en el fluido, es decir, no sedimentan completamente ni se mezclan de manera homogénea con el medio que las contiene, interactuando fuertemente con el fluido y conservando su integridad estructural. La mezcla coloidal se comporta de manera muy particular debido a la gran área superficial de interacción que se origina

entre las dos fases. La reactividad de los suelos se encuentra determinada por el área superficial que es el resultado directo de las dimensiones, formas de las partículas y de la carga de las superficies. Los minerales arcillosos presentan un tamaño reducido de partícula y carga en su superficie, lo cual le otorga propiedades físico-químicas muy particulares; sus pequeñas dimensiones hacen que se comporte como un sistema coloidal cuando entra en contacto con el agua, mientras que la presencia de cargas le permiten atraer sustancias ubicadas en la solución que está en contacto con ellas.^[17]

Cabe destacar que los efectos nocivos de la acidez de los suelos, son debido a causas secundarias provocadas por el pH del suelo, excepto en casos extremos donde las raíces pueden ser dañadas de manera definitiva en suelos con $\text{pH} \leq 3$. Estos efectos secundarios son los siguientes: por un lado, escasez de calcio y algunas veces de fosfato y molibdeno asimilable; y por el otro, exceso de aluminio y manganeso solubles. La importancia relativa de los factores depende de la composición del suelo, en el grado que ella afecta a la proporción de calcio, fosfato, aluminio y manganeso asimilables que aquel contiene, y de la susceptibilidad del cultivo a una deficiencia de calcio o a un exceso de aluminio o manganeso. El manganeso en exceso se acumula en todos los tejidos e interfiere con su metabolismo propio. El aluminio en exceso, se acumula en las raíces y puede reducir de modo muy considerable su poder para transportar fosfatos desde el suelo al sistema vascular, por lo que se le atribuye entonces que la planta sufra deficiencias de fosfato.^[18]

El sistema de fósforo se encuentra condicionado por el pH del medio, así, el ácido fosfórico se disocia de la siguiente manera^[18]:

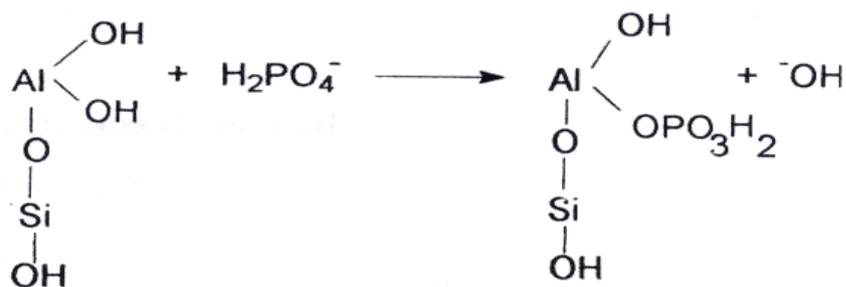


Dentro de las reacciones químicas que pueden involucrar al fósforo, tenemos ^[6]:

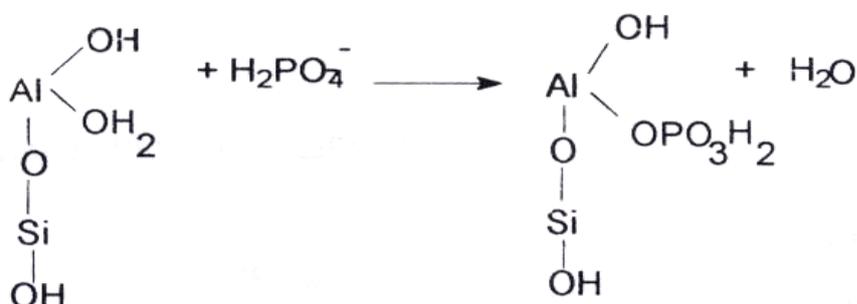
- 1) *Reacciones por sustitución isomórfica*: Estas ocurren cuando se está formando la red cristalina de algún mineral, son poco frecuentes y ocurren especialmente a elevadas temperaturas.
- 2) *Reacciones por precipitación*: Ocurren a distintos pH, (a pH ácido, con cationes como hierro y aluminio, y en condiciones básicas, con cationes como calcio). Tales reacciones están controladas por los productos de solubilidad de los compuestos formados.
- 3) *Reacciones por procesos de adsorción específica o intercambio aniónico*: Se tienen interacciones físicas y químicas, donde el grupo PO_4^{3-} se intercambia con grupos OH^- , lo cual se evidencia por un aumento del pH. Entre los mecanismos de adsorción del fósforo en el suelo, existen varias teorías propuestas para dilucidarlos:

Adsorción por las arcillas. Enlaces insatisfechos:

- a) *Intercambios con grupos OH⁻*: Ocurren en condiciones ácidas y se evidencia por un aumento de pH.



b) *Intercambios con grupos OH₂*: Ocurren en condiciones más ácidas que las anteriores, no hay cambios de pH.

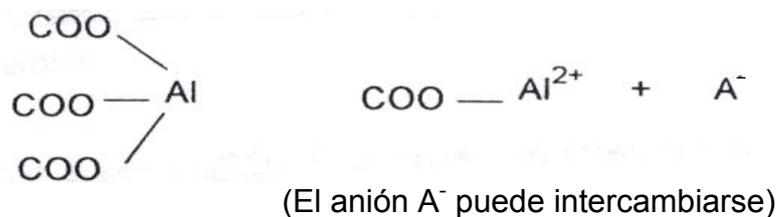


c) *Puente con catión*: Ocurre cuando el fosfato se enlaza a un catión con un enlace insatisfecho y se evidencia con un aumento en la capacidad de intercambio catiónico, puede ocurrir también con la materia orgánica.

Para un catión con un enlace insatisfecho:

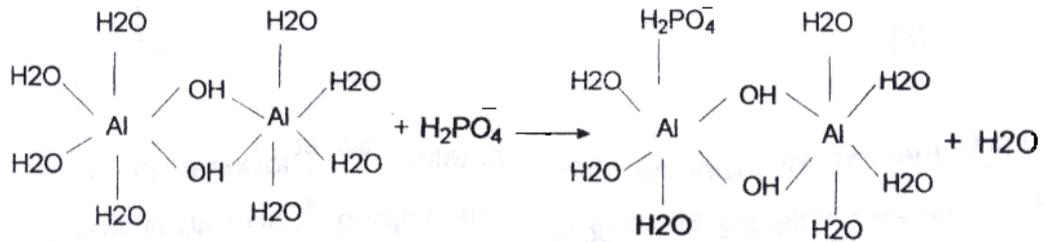


Para la materia orgánica:

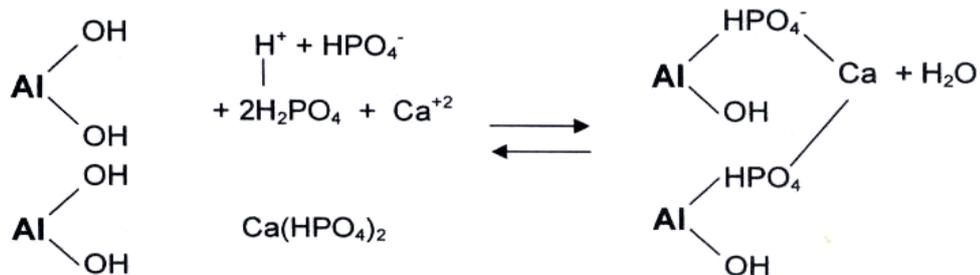


Adsorción por hidróxidos de Fe y Al:

a) *Fijación en polímeros de Aluminio:*

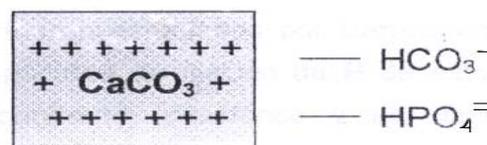


b) *Adsorción en hidróxidos superficiales:*



Adsorción –precipitación en suelos alcalinos:

- a) Ocurren reacciones de precipitación: principalmente con calcio, formando apatitos y otros fosfatos.
- b) Adsorción sobre CaCO_3 : los iones son retenidos en la superficie en forma intercambiable.



En estas reacciones de intercambio aniónico, se presenta un predominio en la adsorción de HPO_4^{2-} porque su producto de solubilidad es menor que el de cualquier otro anión. [6]

La adsorción, es el fenómeno por el cual una sustancia atraída por fuerzas electrostáticas de Van Der Waals, o químicas, se une a la superficie de otros por un período más o menos corto; también se le puede definir como fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie. La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente. El proceso inverso de la adsorción es la desorción. [19]

En general el término *adsorción* se aplica para considerar que el ión adsorbido está localizado sobre la superficie de la fase sólida, mientras que el término *sorción* es utilizado de un modo mucho más general, para indicar el conjunto del proceso de eliminación de fósforo de la solución, bien mediante adsorción, por haber penetrado en la superficie adsorbente formando una unión tridimensional, o bien por precipitación. [20]

1.3 CANTIDAD DE CARBONO EN LOS SUELOS. RELACIÓN C/N Y C/P

El carbono y el nitrógeno son dos elementos esenciales para la nutrición del suelo y deben estar en proporciones adecuadas para favorecer el desarrollo de los cultivos. El parámetro que mide esta relación se denomina C/N. Entre los materiales de origen vegetal seco, que aportan contenidos de carbono, se cuentan hojas secas, virutas, etc., mientras que los materiales de origen animal, como excrementos, restos de animales, material vegetal fresco aportan nitrógeno al sistema. Cuando la relación C/N es muy alta (exceso de carbono) los procesos de descomposición de la materia orgánica en el suelo se hacen lentos, las temperaturas no suben lo suficiente y se pierde el carbono en forma de dióxido de carbono. Si la relación C/N (exceso de nitrógeno) es muy baja se produce pérdida de nitrógeno en forma de

amoníaco, se favorece un aumento desmesurado de las bacterias y aumenta la humificación. En general, los valores de la relación C/N en la materia orgánica de un suelo cultivado casi siempre es de 8:1 a 15:1, siendo el término medio de 10 a 12:1. [15] y [18]

La materia orgánica que llega al suelo sufre profundas modificaciones en su composición y para el desarrollo de este proceso interviene un gran número de grupos de microorganismos, lo que significa que esta materia orgánica no permanece de forma indefinida en el suelo sino que, tras un tiempo, sufre el ataque microbiano y termina mineralizándose. El tiempo de residencia de la materia orgánica en el sistema está en función de los llamados coeficientes de humificación y de mineralización. Ahora bien, la adición de enmiendas orgánicas lleva aparejadas una serie de incidencias en el suelo, sobretodo relacionadas con el estado del nitrógeno, que desde el punto de vista de la nutrición vegetal, es uno de los parámetros que se ve más afectado por la variación del contenido orgánico, al proceder casi en su totalidad de éste. En el proceso de humificación, como es sabido, intervienen numerosos grupos de microorganismos, donde éstos necesitan del nitrógeno para formar sus propias proteínas y desarrollar una mayor población, pero sólo pueden asimilarlo en forma mineral y no orgánica, por ello requieren que las bacterias y hongos realicen esa transformación inicial de dicho material. [15]

Cuando se aportan restos vegetales con una relación C/N elevada, en una primera fase, se produce una inmovilización del nitrógeno presente en el suelo por parte de los hongos encargados de la destrucción de esos restos, principalmente lignínicos. Cuando la citada relación va bajando al producirse el consumo de carbono, utilizado como fuente de energía de los microorganismos del suelo, se inicia una mayor actividad bacteriana que va liberando nitrógeno mineral a la velocidad que los hongos lo inmovilizan. Al mismo tiempo se produce la muerte de muchos de ellos y su transformación por parte de las bacterias con liberación del

nitrógeno que posee. En ese lapso de tiempo el nitrógeno del suelo no sufre variaciones significativas. Finalmente, cuando la relación C/N es baja, los compuestos presentes son atacados con mayor facilidad por las bacterias que equilibran su población, por lo que va resultando un excedente de nitrógeno que queda en el suelo en forma mineral, lo cual produce una liberación del elemento que será utilizado por las plantas posteriormente. ^[21]

Como se expresó anteriormente, cuando los microorganismos descomponen la materia orgánica liberan nutrientes como N, P, S que están presentes en ella. Cuando ocurre lo contrario, es decir, cuando utilizan los elementos de la solución para efectuar su anabolismo, ocurre la llamada inmovilización de los nutrientes. Ambos procesos pueden ocurrir simultáneamente, donde la predominancia de uno de ellos puede llevar el aumento o disminución de los elementos de la solución del suelo. El fósforo orgánico, puede también sufrir mineralización pasando a formas solubles o ser inmovilizado temporalmente o definitivamente por los microorganismos. Enwezor (1968) ^[22] considera que la relación C/P de la materia orgánica determina que predominen o no las reacciones de mineralización o inmovilización estableciendo como nivel crítico el valor de 200 para esa relación. Valores superiores indican que predominarán las reacciones de inmovilización (altos contenidos de carbono), y a valores inferiores predominarán las de mineralización (bajos contenidos de carbono). ^[21]

1.4 ENMIENDAS ORGÁNICAS

Las enmiendas orgánicas son aquellos materiales que primariamente modifican las características físico-químicas y/o químicas, o la actividad biológica sin tener en cuenta su valor como portadores de nutrientes. Sin embargo, normalmente las

ventajas de su uso derivan de los dos factores. Además de ser una fuente completa de nutriente para las plantas, los fertilizantes orgánicos aportan materia orgánica al suelo, que para suelos arenosos o con arcillas de baja actividad, representa una mejora en las propiedades físicas, químicas y biológicas por su efecto acondicionador.

Existen por lo menos 13 elementos nutritivos esenciales que las plantas obtienen del suelo, pero dejando de un lado a los elementos micronutrientes quedan 3 elementos: el nitrógeno, el fósforo y el potasio, que cuando se usan acertadamente tienden a reprimirse, equilibrarse y suplementarse. Esta relación es muy importante en la práctica fertilizadora, ya que relaciona íntimamente con la economía y efectividad de los fertilizantes.

Dentro de las clases de enmiendas orgánicas se encuentran: abono verde, residuos animales, residuos agroindustriales y residuos sólidos domiciliarios. El uso de las mismas presenta las siguientes ventajas:

- Aumento de la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- Aumento de la capacidad de regulación química del suelo.
- Aporte de sustancias de crecimiento.
- Aumento en la disponibilidad de micronutrientes, no solo por ser fuente, sino principalmente por los cationes micronutrientes quelatados.
- Aumento de la disponibilidad de fósforo, no solo por su aporte directo, sino también al reducir la cantidad de compuestos insolubles de hierro y aluminio.
- Mejora la estructura del suelo, promoviendo mayor aireación y crecimiento radical.
- Aumento de la capacidad de retención de agua

Y las siguientes desventajas:

- La mayoría de las enmiendas orgánicas no pueden ser utilizadas por las plantas inmediatamente, ya que tienen la propiedad de ser de lenta liberación de nutrientes para la solución del suelo.
- Escasez de enmiendas con diferente composición química.
- Contaminación del medio ambiente (metales pesados, olores, metano entre otros), durante su descomposición. El grado de contaminación se dará según el material de origen ^[23]

1.5 EMULSIONES ASFALTICAS

Mediante el empleo de disolventes selectivos (pentano, hexano y heptano) es posible separar del asfalto dos grandes grupos de componentes, conocidos como asfáltenos y maltenos. Los primeros son sólidos quebradizos que no funden. Los maltenos están constituidos a su vez por una fracción saturada (aceite) y por otra aromática (resinas).

Los asfáltenos es uno de los componentes del asfalto el cual al mezclarse con una matriz acuosa forman las llamadas emulsiones asfálticas. Las emulsiones en general se pueden definir como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante o emulsionante.

Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parciales o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). En el caso de emulsiones asfálticas, los líquidos no miscibles son el agua y el asfalto. Adicionalmente se tiene el emulgente el cual se

deposita en la interfase entre el agua y el asfalto estabilizando la emulsión; este depende del tipo de emulsión que se requiere.

Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300 g/mol); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico y una parte soluble en medio acuoso (generalmente es un grupo polar del tipo orgánico o inorgánico).

El componente hidrofóbico (radical alquilo) es uno de los componentes de los emulsificantes. El otro está representado por la parte hidrofílica. Ambos se encuentran saponificados y en contacto con el agua ocurre la disociación, quedando con cargas negativas o positivas según el tipo de emulsificante. De esta manera, los emulsificantes aniónicos, tienen grupos ácidos en su parte hidrofílica, con carga eléctrica negativa y fórmula molecular R-COONa. Cuando este tipo de emulsificante se encuentra en un medio acuoso se disocia resultando:



Y el grupo carboxilo COO^- se va a la parte hidrofílica, mientras que el radical se queda en la parte hidrofóbica.

Los emulsificantes catiónicos son generalmente grupos aminos con cargas eléctricas positivas y con fórmula general R-NH₃Cl. Cuando este tipo de emulsificante actúa en un medio acuoso se disocia resultando:



Y el grupo amino se va a la parte hidrofílica mientras que el radical alquilo se queda en la parte hidrofóbica.

Los emulsificantes – una vez producida la emulsión- son los que se sitúan en su mayor parte en la interfase. Su parte hidrofóbica se dirige hacia el asfalto y su parte polar hacia el agua. Con estos emulsificantes iónicos las partículas adquieren cargas eléctricas del mismo signo, repeliéndose entre ellos y estabilizándose el sistema. De allí nacen los tipos de emulsiones asfálticas de acuerdo al emulgente usado: Emulsiones aniónicas y Emulsiones catiónicas.

También de acuerdo a la estabilidad de las emulsiones asfálticas se pueden clasificar en:

- De rompimiento rápido.
- De rompimiento lento.
- De rompimiento medio.
- Para impregnación.
- Súper estables.

En general los factores que influyen en la ruptura de la emulsión aniónica son la evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua de la emulsión y la adsorción superficial de una parte del emulsificante en el material base.

Entre las ventajas más importantes de las emulsiones asfálticas se encuentran:

- Es un ligante asfáltico no contaminante ni peligroso, ya que contienen del 35 a 40 % d agua como solvente.
- Su manejo es sencillo y seguro, gracias a su baja viscosidad a temperatura ambiente.
- Presenta bajo costo de la fase dispersante, que es agua.

- ❑ Tiene una gran adhesión con cualquier agregado, a pesar de condiciones de humedad adversas, debido a la enorme dispersión de las partículas de asfalto, de tamaño muy pequeño y el uso de agentes emulsificantes de tipo catiónico.
- ❑ El equipo de aplicación es más sencillo debido a que todos sus componentes se aplican a temperatura ambiente
- ❑ Por su aplicación en frío ayuda a no alterar el medio ambiente y queda suprimida la emisión de humos o gases.
- ❑ Empleando el agua como solvente no crea problemas de su desperdicio, ya que es recuperable.

Las desventajas de las emulsiones asfálticas son principalmente el tiempo de fraguado (lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido), la complicada química y reología que se desarrolla en las emulsiones, pues los compuestos químicos presentes en el asfalto como los asfáltenos y maltenos, son variables y de diferente naturaleza química.

Luego de definir las características generales, ventajas y desventajas, y de conceptualizar los términos de enmiendas orgánicas y emulsiones asfálticas es importante destacar lo distintos métodos de fraccionamiento químico que permiten la determinación cualitativa y cuantitativa de las distintas fracciones de fósforo en suelos en los cuales sean aplicadas las enmiendas y emulsiones anteriormente desarrolladas.

1.6 FRACCIONAMIENTO QUÍMICO DE FÓSFORO. DEFINICIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS

El P, luego del nitrógeno, es el macro-nutriente que en mayor medida limita el rendimiento de los cultivos, interviene en numerosos procesos bioquímicos a nivel celular y se lo considera un elemento esencial para las plantas.

El P en el suelo se encuentra de dos maneras, orgánica e inorgánica. Gran parte del fósforo, está en forma orgánica, la cual se encuentra en diferentes niveles de estabilización en el humus del suelo. Dentro de la compleja configuración del humus, podemos distinguir sustancias orgánicas más accesibles para las plantas (lábil) y otras de menor accesibilidad (no lábil). El P inorgánico está representado por diferentes fracciones: P presente en los minerales primarios, P adsorbido (lábil) en las arcillas, P en solución, que es el aprovechable por las plantas (HPO_4^- y H_2PO_4^-) y P no lábil (poco disponible) representado por P precipitado. [24]

Estas distintas clases de fósforo en el suelo son definidas de acuerdo al extractante que las remueve. Varias técnicas de fraccionamiento han sido propuestas a fin de identificar las diferentes formas. El método desarrollado por **Chang y Jackson** [25] con modificaciones tales como las de Petersen y Corey [26] y Williams et al. [27] ha sido muy utilizado. Sin embargo, estos procedimientos han ignorado el P_o , habiéndose demostrado la importancia del mismo en la nutrición de las plantas, principalmente en suelos tropicales [28] y [29]. En los últimos años el procedimiento de extracción secuencial de distintas fracciones de P_i y P_o desarrollado por **Hedley et al.** [30] y Tiessen et al. [31] ha sido el más utilizado [32], debido a que es considerado como una herramienta válida para entender la dinámica del P en el suelo [33] y ha resultado apropiado para reflejar los cambios en las fracciones de fósforo, causados por el agregado de fertilizantes. En las distintas

soluciones se determina el Pi y Po extrayendo al principio las formas más lábiles, finalizando con las formas más resistentes ^[32]. Entonces, biológicamente el Pi disponible es removido primero con una resina de intercambio iónico seguido por un suave extractante (NaHCO_3), usados para remover las formas de Pi y Po “lábiles” ^[34]. A este paso se incluye, el tratamiento con CHCl_3 (biocida) por medio del cual se remueve el P liberado de los microorganismos del suelo ^[35]. Luego, la extracción con NaOH estima el Pi ligeramente adsorbido a minerales de Fe y Al. Y Finalmente, las formas de P estable, tales como compuestos de Po y Pi altamente insolubles, son clasificadas como resistentes con casi ninguna posibilidad de movilización a través de formas de P con alta labilidad. ^[34]

Cabe destacar que el fraccionamiento de Hedley et al hasta la fecha ha tenido un sin fin de modificaciones realizadas por diversos autores de acuerdo a sus necesidades según los tipos de suelos y estudios a realizar, con el fin siempre de realizar mejoras al método propuesto.

Ahora, cuando se trata de la determinación de fósforo orgánico cuatro métodos adicionales pueden ser nombrados por su trascendencia y utilidad a través del tiempo: Saunders y William, (1955) ^[36], Mehta et al. (1954) ^[37], Bowman (1989) ^[38] y Bowman y Cole (1978) ^[39]. Este último autor señala en su trabajo que el Po constituye una reserva que es gradualmente utilizada de acuerdo al equilibrio del elemento en el suelo. ^[39]

El primer método mencionado **Saunders y William** se corresponde con los denominados métodos de ignición, que se fundamentan en la descomposición del Po por tratamiento calórico a 550°C , determinando la cantidad de Pi liberado después del tratamiento ^[38]. Aunque este método resulta mucho más sencillo que el segundo método (método de extracción) la ignición puede causar pérdidas de Po por volatilización ^[40]. Este método permite la destrucción de la muestra y aunque es

considerado como estándar puede llegar a sobreestimar el Po al solubilizar otras formas de Pi como el P mineral ^[41].

Por otro lado los métodos de Mehta et al. (1954), Bowman (1989) y Bowman y Cole (1978) se corresponden con los llamados métodos de extracción, que involucran el tratamiento del suelo con ácidos y bases fuertes, por lo que pueden sobreestimar la cantidad de Po debido al efecto de hidrólisis que causan las soluciones alcalinas ^[40].

El método de **Mehta** et al. (1954) es el más conocido, pero sólo permite estimar la cantidad del Po total. Lo novedoso del método de **Bowman y Cole** ^[39] y ^[42] es la extracción inicial que se realiza con bicarbonato de sodio, el cuál en teoría extrae fracciones de Po muy lábiles; además determina las diferentes fracciones del Po, lo cual permitiría definir las vías de equilibrio del P en el suelo en un sistema agrícola. En su trabajo, al estudiar cinco suelos localizados en Norte América ^[39], se logró la identificación del siguiente esquema de fraccionamiento de P:

- Fracción Lábil (extraído con NaHCO_3)
- Fracción moderadamente Lábil (Po soluble en ácido y Pi soluble en base)
- Fracción moderadamente resistente (P ácido fúlvico)
- Fracción altamente resistente (P ácido húmico).

El otro método de extracción es el de **Bowman** (1989), el cual implementó otra alternativa para la extracción de fósforo orgánico con ácido sulfúrico concentrado y bases diluidas. Se emplea una forma más sencilla y menos engorrosa de obtener los extractos que contienen el Pt y el Pi basado en la alta eficiencia que presenta el Po a ser extraído de los suelos, por una solución caliente producto de la adición de agua a H_2SO_4^- (c). De esta manera, se preserva esencialmente todo el fósforo orgánico en el extracto, contrario a los métodos de ignición, que destruyen la muestra luego de analizada. Este procedimiento modifica el tiempo secuencial

empleado por otras metodologías, reduciéndolo considerablemente. Y a pesar de las desventajas planteadas es un método preciso y adecuado para la cuantificación de fósforo - sobretodo para analizar grandes cantidades de muestras- por su simplicidad y relativo bajo costo en cuanto al uso de reactivos ^[38].

1.7 ANTECEDENTES

Se presentan a continuación, los antecedentes más relevantes de suelos estudiados con distintas enmiendas orgánicas y distintos fraccionamientos químicos de P; y luego los referidos a suelos tratados con emulsiones asfálticas, los cuales son de interés para el desarrollo de este trabajo.

1.7.1 ENMIENDAS ORGÁNICAS (Cambios en la productividad del suelo asociados a un aumento de materia orgánica)

Las diferentes alternativas agroecológicas como labranza mínima o reducida, lombrices de tierra, rocas fosfóricas, micorrizas, abono verde, majada, etc. son consideradas fuente de materia orgánica fundamental para la manutención de la calidad del suelo y para lograr una productividad sustentable.

En diversos antecedentes donde suelos de sabana venezolanos han sido estudiados, se han utilizado estas clases de mantenimiento agroecológico, resumiéndose los más destacados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de diversos trabajos realizados en suelos ácidos de sabana a nivel nacional.

Nº	Zona de Estudio	Ubicación	Objeto de Estudio	Formas de P y métodos	Autor
1	Calabozo	Guárico	-Suelo Protegido -Suelo sometido a quema	-P _{disp.} (Anderson e Ingram, 1992) - P _{ot} Saunders y Williams, 1955 ^[36] -Fracciones de P: Bowman y Cole (1978) ^[39] Hedley y Col (1982) ^[30] Bowman (1989) ^[38]	Hernández . Valencia, 1996 ^[43]
2	Bramón Iguana Veguitas BajoSeco Mantecal Barinas Iguana II Casupal Palmeras	Bramón Iguana Guanare Bajoseco Apure Barinas Iripe Monagas Guárico	-Suelos con fertilizante fosforado (Roca fosfórica de Monte fresco)	-P _{disp.} Bray I -Fracciones de P: Hedley et al. (1982) ^[30] modificado. Fue aplicado a dos suelos (Iguana y Bramón)	Romero, 1994 ^[35]

Continuación Tabla 1. Resumen de diversos trabajos realizados en suelos ácidos de sabana a nivel nacional.

Nº	Zona de Estudio	Ubicación	Objeto de Estudio	Formas de P y métodos	Autor
3	Puerto Ayacucho	Amazonas	- gallinaza y cochinaza con residuos vegetales. - gallinaza mezclada con cal y residuos vegetales. - excremento de ganado (Majada)	- Po Hedley y col (1982) ^[30]	López-Contreras y col, 2007 ^[48]
4	Santa Bárbara El Cafetal Junquito	Monagas Miranda Distrito Federal	-labranza mínima, reducida y convencional. - abono verde - Lombrices de Tierra	-Fracciones de P: Ojeda- López – Hernández (1994) ^[61] versión modificada de Hedley et al (1982) ^[30]	Ojeda, 1995 ^[46] y Ojeda, 2000 ^[51]
5	Uverito.	Monagas	- Pinares.	- Hedley et al (1982) ^[30] modificado por Tiessen y Moir (1993) ^[50]	Hernández y Bautis, 2005 ^[52] .

Hernández realizó en su trabajo una comparación entre cuatro diferentes métodos para la determinación de Po. Según los resultados del autor los CV determinados por Hedley y col (1982) y Bowman y col (1978) fueron ligeramente superiores como producto de mayores secuencias de fraccionamiento que pudieron incrementar los errores de los datos ^[43].

Por otro lado los mayores valores de Po obtenidos por el método de Saunders y William (1955), se debe a su capacidad para mineralizar las fracciones de Po residuales no cuantificadas por los otros métodos ^[43]. Además, la ignición puede liberar a la solución extractora Pi que se encontraba formando parte de la matriz del suelo y en consecuencia ocurre una sobreestimación del Po. Para las metodologías restantes las diferencias entre las soluciones extractantes no son muy marcadas. La extracción alcalina se realiza con NaOH 0,5 N en los métodos de Bowman (1989) y Bowman y Cole (1978) mientras que con el método de Hedley y col (1982) se utiliza NaOH 0,1 M. El hecho de utilizar una solución de NaOH más concentrada en los dos primeros métodos puede permitir una mayor extracción de la materia orgánica soluble en álcali, pero también es posible provocar mayor hidrólisis de la materia orgánica y en consecuencia subestimación de esta fracción de Po. Las formas lábiles serían las más sensibles a esta hidrólisis y en el caso de la metodología de Hedley y col (1982) la extracción previa con bicarbonato permitiría recuperar dichas formas.

De la misma forma la extracción ácida en el método de Bowman (con H₂SO₄(c)) puede ser muy fuerte y provocaría mayor hidrólisis de Po en comparación al resto de los métodos que utilizan una extracción con ácido diluido (HCl o H₂SO₄ 0,1 M) ^[43].

Bowman (1989) señala que la extracción alcalina puede hidrolizar parte del Po, especialmente aquella fracción lábil extraíble con bicarbonato de sodio a pH 8,5. ^[38]

Condrón y col (1990) en una evaluación de los métodos de Bowman (1989), Saunders y Williams (1955) y una modificación de Anderson- Metha (1960) ^[44], en suelos de Ghana y Brasil, encontraron de igual forma que el método de Saunders y Williams (1955) presentaba los valores de P_o más altos y el CV más bajo con respecto a los restantes métodos, mientras que los resultados de Bowman (1989) y Anderson-Metha (1960) eran muy similares. ^[45]

Romero, por su parte, realizó un estudio del efecto del contenido de humedad del suelo en la disolución de la roca Fosfórica de Monte Fresco. Para ello se llevó a cabo un ensayo de incubación con diferentes suelos venezolanos, los cuales fueron tratados con rocas fosfóricas en dosis de 300 ppm de P. El ensayo incluyó períodos de incubación de 1, 3, 7, 15, 30, 60 y 100 días teniendo los suelos contenidos de 30, 60 y 100 % de agua aprovechable. Los resultados indicaron que el P extraído aumentó con el tiempo de incubación arrojando en la mayoría de los suelos, un máximo a los 15 días. Esto fue explicado en base a la evolución de la actividad biológica, la cual se estima tuvo una marcada influencia en dichos resultados. Así mismo se evidenció que las diferencias significativas se mostraron entre los suelos con porcentajes de agua contrastantes, es decir entre 30 % y 100 %, para el 60 % no hubo diferencias significativas con respecto al 30 %. De esta manera el contenido de humedad en los suelos al 100 % indujo una disminución del P extraído, lo cual fue atribuido a la formación de compuestos poco solubles entre el P liberado de la roca y los compuestos organominerales del suelo ^[35].

En este trabajo también se efectuó un fraccionamiento de P en dos de los suelos bajo estudio, arrojando una mayor cantidad de P en las fracciones solubles para el suelo Bramón. Esto lo atribuye a una alta actividad microbiana. El suelo Bramón, sigue la línea de suelos arcillosos, y estos suelos generalmente son más altos en contenido de P_o que los suelos de textura gruesa. La mayor capacidad de fijación de P del suelo Bramón, permite suponer que el P liberado de la roca rápidamente va a ser adsorbido

por la matriz del suelo, en compuestos organominerales de solubilidad variable, evitando así el enriquecimiento de las fracciones solubles. ^[35]

Agbenin et al realizaron un estudio comparativo de las diferentes técnicas para la determinación de Po en suelos de Sabana de la región de Nigeria. Las metodologías a comparar fueron las de Saunders y Williams (1955), Bowman (1989) y Bowman y Moir (1993). Los resultados arrojaron significativa ventaja en el porcentaje de recuperación de fósforo orgánico bajo la metodología de Bowman (1989) al extraerlo con ácido fuerte y base diluida. Las técnicas de ignición y EDTA, obtuvieron valores similares de recuperación. La precisión de los métodos usados, estuvo determinada por el Coeficiente de Varianza (CV %), el cual favoreció de manera tajante a la metodología de Bowman (1989) (CV=13 %), seguida de la de Bowman y Cole (1993) (CV= 15 %) y por último a la de Saunders y Williams (1955) (CV= 18 %). Finalmente, también realizaron la determinación de la relación C/Po, con lo cual pudieron dar una idea de que los métodos de ignición y EDTA-base, sobreestiman el fósforo orgánico en dichos suelos. Con este trabajo, los autores concluyen que el mejor y más rápido método para la estimación de Po en suelos de sabana, es el propuesto por Bowman (1989), pues simplifica de manera eficaz los pasos a seguir para lograr esta determinación ^[41].

Ojeda estudió la influencia de distintos abonos verdes con contenido de fósforo contrastante (*Pennisetum purpureum*, *Cenchrus ciliaris* y *Pueraria phaseoloides*) como alternativa de manejo agroecológico, inoculados en columnas a 20 cm de profundidad. Dichas columnas se depositaron en envases de polietilentereftalato (PET), provisto de un sistema de drenaje que permitió mantenerlas a capacidad de campo y coleccionar los lixiviados. Cantidades equivalentes de 12 t/Ha de estas enmiendas fueron incorporadas en los primeros 5 cm de la columna. Los tratamientos fueron replicados tres veces y se realizó un muestreo aleatorio en cada columna a los 2, 4, 8, 16, 32 y 64 días, para luego realizar el fraccionamiento de fósforo según el método de Hedley y Col. (1982) modificado en 1994 por Ojeda y López-Hernández ^[61]. Los resultados obtenidos fueron

contrastantes entre los tratamientos y las distintas fracciones lábiles de P, en particular entre la fracción inorgánica de fósforo resina, que presentó los más altos valores durante los primeros 16 días de incubación en aquellos tratamientos con los más altos valores de P total. El tratamiento con *Cenchrus Ciliaris* aportó mayor contenido de fósforo en el sobrenadante de agua donde se agitó la resina y en contraste con el resto de los tratamientos, las formas orgánicas e inorgánicas de la fracción de fósforo soluble en bicarbonato de sodio presentaron menores fluctuaciones durante los primeros 16 días de incubación. El autor concluye que la aplicación de estas enmiendas orgánicas, al contribuir al reestablecimiento parcial de los elementos minerales extraídos del suelo durante las cosechas, al aumentar la materia orgánica y fomentar condiciones más apropiadas, pueden estimular un incremento sensible de la fracción de fósforo potencialmente lábil en el suelo y reducir la alta dependencia de las costosas fuentes solubles de fertilizantes fosfóricos ^[46].

López-Contreras y col. compararon los cambios en los contenidos de fósforo, calcio, magnesio, potasio y materia orgánica en suelos de sistemas de producción orgánica en donde se ha usado: a) gallinaza y cochinaza con residuos vegetales, b) gallinaza mezclada con cal y residuos vegetales y c) excremento de ganado. Adicionalmente se estudió un sistema agrícola convencional de altos insumos y en el que se utilizó fertilización inorgánica y arado. Los resultados muestran que los abonos orgánicos mejoran la fertilidad de los suelos, no solo aumentando los niveles de fósforo disponible, orgánico y total, sino también la disponibilidad de cationes y materia orgánica, que eventualmente favorecen la producción vegetal y mejoran de manera apreciable las propiedades físicas y estructurales de estos suelos arenosos. Por el contrario, en el sistema de agricultura convencional, no se detectaron diferencias significativas en los contenidos de P y cationes respecto a las sabanas cercanas. En cuanto a la materia orgánica se ha determinado que la misma puede limitar el contenido de P_{disp} por lo que se ha postulado una relación C/P_o que controla la disponibilidad de P, en forma parecida como la relación C/N. Mc Gill y Cole (1981) sugieren que valores de

C/P_o mayores a 200 se asocian a una deficiencia de P_{disp.}, produciéndose una inducción de la hidrólisis de esteres fosfatos más rápidamente que la oxidación del carbono. Al contrario, en suelos con altos contenidos de P_{disp.}, la relación C/P_o es baja (<100) y se reprime la producción de fosfohidrolasas ^[47]. Los resultados evidenciaron que la introducción de abonos del tipo SPC (Cochinaza) y SPG (Gallinaza) la relación C/P_o es menor que 100, por lo que estos sistemas mantienen altos niveles de P_{disp.}. En los sistemas de Majada y agricultura convencional, la relación C/P_o es mayor que 100, lo cual pudo ser producto de la mineralización del P_o adicionado en forma orgánica para suplir las necesidades del cultivo (agricultura convencional) o bien por el alto contenido de carbono orgánico en el abono (Majada) ^[48].

Díaz estudió la transformación del fósforo orgánico que está contenido en las partículas de diferentes intervalos granulométricos, en un suelo ácido de sabana tratado con enmiendas orgánicas (abono verde y orgánico), así como la cantidad de carbono y su relación con el P orgánico. Se determinaron las formas orgánicas de fósforo asociadas a los extractos ácidos y básicos obtenidos mediante la metodología propuesta por Bowman (1989). Este fraccionamiento permitió obtener los mayores valores de P para el extracto ácido y para la enmienda: abono orgánico. Díaz utilizó la relación C/P_o citada en el trabajo de Enwezor ^[22], encontrando que el control sabana natural presentó inmovilización del P (C/P_o>300) en el tamaño de partícula más grande y las enmiendas utilizadas presentaron mineralización del P (C/P<200) en las partículas más pequeñas. Se presenta, además una mayor concentración de la forma orgánica de fósforo en el intervalo de tamaños de partículas mas finas (<38 μm). Concluye que la aplicación de enmiendas orgánicas favorece significativamente el incremento de las cantidades de fósforo orgánico e inorgánico debido al aceleramiento de la actividad de los microorganismos, lo que genera mayores procesos de mineralización de P_o y posterior transformación en P asimilable para las plantas ^[49].

Enwezor evidenció la importancia del fósforo orgánico en los suelos y cómo esa forma de fósforo representa una reserva para las formas disponibles de P en función de la nutrición de las plantas. También estudió los rangos de mineralización del fósforo orgánico y sugirió una relación C/P_o para establecer si existen procesos de mineralización o de inmovilización del P_o en los suelos analizados. En relación a esto, encontró que si el rango de C/P_o en la materia orgánica es menor que 200 hay mineralización inicial del P_o , en cambio, si el rango es mayor a 300 hay evidencia de procesos de inmovilización inicial de fósforo orgánico, por lo que se hace menos disponible hacia los reservorios de fósforo soluble ^[22].

Al revisar la bibliografía se pudo constatar que este material solo comprende la técnica de fraccionamiento químico de fósforo en suelos con diferentes alternativas de manejo agroecológico, no habiéndose encontrado información valiosa acerca del fraccionamiento en suelos incubados con emulsión asfáltica, como es el caso en estudio. En vista de esto se tiene una nueva revisión - mucho menos extensa que la de fraccionamiento - acerca de suelos tratados con emulsiones asfálticas, características físicas determinadas y mediciones preliminares que darán indicio de cómo tratar las muestras, en que dosis y en cuanto tiempo; además de ser útiles para resaltar las ventajas y desventajas de este tipo de manejo (emulsiones asfálticas).

1.7.2 EMULSIONES ASFÁLTICAS

El uso de las emulsiones tanto aniónicas como catiónicas en forma directa, ha indicado la potencialidad de esta alternativa en el área agrícola, tanto a nivel internacional como ahora en el nacional.

Sánchez evaluó el efecto de la incorporación de abonos orgánicos: cachazas de caña, gallinaza y pulpa de café (en dosis de 8 y 16 Mg/Ha) y la aplicación superficial de

emulsión asfáltica (en dosis de 1.5 V/V) sobre las pérdidas de suelo, agua, nutrientes y el rendimiento de cebollín. Los resultados indicaron una mayor eficiencia con la emulsión asfáltica (EA), con reducciones de pérdidas de suelo y agua del 90 % y 67 % respectivamente, resultando por consiguiente con las menores pérdidas de nutrientes. Los abonos orgánicos (AO) no mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto al testigo en cuanto a eficiencia sobre las variables señaladas. Por otra parte se encontró que tanto los AO como la EA produjeron un efecto positivo sobre aquellas condiciones relacionadas con el comportamiento mecánico del suelo, la aireación y la dinámica del agua, sobresaliendo el tratamiento con EA; sin embargo no se encontraron diferencias en relación a la estabilidad estructural del suelo al comparar el testigo con el resto de los tratamientos ^[53].

Pla y col. Estudiaron el uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de sorgo en un Alfisol franco arenoso de Los Llanos ondulados del norte del estado Guárico. Entre sus resultados destacan un aumento en las tasas de infiltración, de 20 mm/ha en el suelo sin tratar a 100 mm/ha en el suelo tratado con emulsión, lo que los lleva a asumir que las pérdidas por escorrentía en el caso del suelo tratado eran insignificantes, mientras que en el suelo sin tratar disminuye la infiltración debido al sellado superficial por el impacto de las gotas de lluvia. Llegan a la conclusión de que con la aplicación de una fina película de emulsión de asfalto en la superficie del suelo, se logra un aumento en la producción total del cultivo, al evitar el déficit de agua y reducir las pérdidas del suelo por erosión ^[54].

Lobo y col. utilizaron emulsión catiónica (95 % de cemento asfáltico y 5 % de emulsificante) en aspersion superficial sobre suelo (Ultisol) seco de la estación Exp. de Guanipa, en una suspensión con una relación asfalto/agua de 1/6, a razón de 1 t/Ha. Los resultados indicaron que el rendimiento del maní en el tratamiento de suelo con asfalto duplicó el rendimiento del maní del suelo sin tratar y que las aplicaciones superficiales de emulsiones asfálticas contribuyen notablemente a la conservación del

agua en el suelo superficial, especialmente en la etapa inicial del cultivo, haciendo el régimen hídrico más regular frente a la irregularidad de las lluvias ^[2].

Pla y col. (1981) utilizaron emulsiones asfálticas (95 % cemento asfáltico y 5 % de emulsificante) en una relación asfalto/agua de 1/6 y de 1/12 sobre 9 suelos potencialmente agrícolas (agricultura de secano) de Los Llanos de Venezuela; para 8 de ellos emulsión aniónica y para el último emulsión catiónica en cantidades de 1.5 t/Ha. Los autores indican que las emulsiones pueden ser mezcladas y aplicadas conjuntamente con herbicidas y fertilizantes líquidos. Al determinar la profundidad de humedecimiento y cantidad de suelo erosionado -arrastrado por el agua de escorrentía después de una lluvia simulada de 100 mm (en una hora)- de los 9 suelos, los resultados arrojaron que los efectos del tratamiento con asfalto resultan ser tan efectivos, como los de una cobertura total del suelo con residuos vegetales secos. Con respecto al suelo testigo, el incremento de la emergencia de las plántulas (sorgo, maíz, algodón y ajonjolí) era significativamente mayor en los suelos tratados superficialmente con asfalto. En el suelo de Chaguaramas, el único con emulsión catiónica, se obtuvo un rendimiento de sorgo y un crecimiento de plántulas que duplican al tratamiento testigo. Concluyen que las emulsiones estabilizan los agregados del suelo superficial frente al impacto de las gotas de lluvia y minimizan las pérdidas por evaporación del agua de lluvia almacenada en el suelo ^[9].

Salem y col. evaluaron el efecto de las emulsiones asfálticas sobre la retención y liberación de algunos elementos nutrientes, metales pesados y agregación en dos muestras de suelos, provenientes de Egipto y Bélgica respectivamente. La emulsión fue aplicada en dosis severa para promover la formación de agregados, estabilizarlos y hacer las muestras de suelo más hidrofóbicas. Ellos concluyen que las emulsiones asfálticas pueden ser usadas para reducir la pérdida de nutrientes y para incrementar el estado de agregación y la estabilidad de los agregados en suelos arenosos. Demostraron, además que las emulsiones asfálticas pueden ser usadas para disminuir

los niveles de Fe, Zn, Mn, Cu, Cd y Pb en suelos contaminados, característica ventajosa de las emulsiones ^[55].

Fortún y Fortún cuantificaron los agregados de dos tipos de suelos (arcilloso y arenoso-arcilloso) tratados con emulsión asfáltica catiónica y otras enmiendas orgánicas utilizando microscopía electrónica de exploración. El montaje se realizó en bandejas plásticas a 25 °C por 60 días y regados periódicamente con agua desionizada. Los mejores resultados obtenidos en cuanto a la estabilidad de los agregados fueron para el suelo arcilloso enmendado, mientras que la emulsión asfáltica como tratamiento incrementó el tamaño y la estabilidad de los agregados para ambos suelos. Concluyen que las emulsiones asfálticas mejoran la estructura de ambos suelos, debido al efecto cementante de la emulsión y a su hidrofobicidad, y cuando esta emulsión es mezclada con otras enmiendas orgánicas (estiércol y paja) la estructura mejora, lo cual se debe al efecto pegajoso y a procesos de micro-agregación ^[56].

Con el trabajo de Fortún y Fortún se finaliza la etapa de revisión bibliográfica, en donde se destacaron los aspectos que se consideraron sobresalientes exponer en este trabajo. A continuación se plantearán los objetivos involucrados con la realización del mismo.

OBJETIVOS

Con el propósito de contribuir con el proyecto UCV-INTEVEP, que involucra el aprovechamiento de enmiendas asfálticas en suelos ácidos de sabana, se plantearon los siguientes objetivos:

GENERAL

- Realizar un fraccionamiento secuencial de fósforo en un suelo ácido de sabana tratado con emulsión asfáltica.
- Realizar un fraccionamiento secuencial de fósforo en un suelo ácido de sabana tratado con emulsión asfáltica y roca fosfórica acidulada como fertilizante.

ESPECÍFICOS:

- Determinar el efecto de la incubación con emulsiones asfálticas tanto catiónicas como aniónicas sobre las fracciones orgánicas de P en un suelo ácido de sabana. Así como también el efecto en suelos tratados con emulsión y roca fosfórica en conjunto.
- Determinar la relación C/P orgánico en suelos incubados con emulsiones sin (y con) roca fosfórica.

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona objeto de estudio, está ubicada en Los Llanos Orientales Venezolanos, que recientemente se han visto sumamente influenciados por la explotación de la faja petrolera del Orinoco, lo que ha generado un desarrollo acelerado de las ciudades involucradas en la actividad petrolera, con un consecuente aumento poblacional en las mismas y por ende un incremento en la necesidad de una mayor producción de alimentos. De esta zona las características con mayor relevancia a mencionar son:

2.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio está ubicada específicamente en la unidad de producción agrícola llamada “Hato Rancho Grande”, en el Municipio Monagas al sur del Estado Anzoátegui a 60 Km aproximadamente de la población de Pariaguán, con coordenadas UTM 20 P 0289156 E 0954006 N y una altitud de 243 m.s.n.m.



Figura 6. División política del estado Anzoátegui [57].

2.1.2 CLIMA

El clima, se ve afectado por la zona de Convergencia Intertropical, con su mayor influencia en los meses desde mayo a noviembre; presentando una temperatura media anual de 26,2 °C, con una amplitud entre el mes más cálido y menos cálido de 1,8 °C [58]. La zona en general presenta una temporada de lluvia ubicada de mayo a noviembre, donde se suceden entre el 90% y 91% de las precipitaciones anuales; y otra de sequía ubicada de noviembre a abril, donde ocurre sólo entre el 9 y 10% de las precipitaciones anuales. Los valores de precipitaciones anuales oscilan entre 885 mm y 925 mm [58].

2.1.3 GEOLOGÍA

La zona se encuentra enmarcada dentro de la Formación Mesa, que está conformada por arenas de grano grueso y gravas con cemento ferruginoso cementadas y muy duras; conglomerado rojo a casi negro; arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limonita [59]. En general el material proviene de varios ríos del Escudo Guayanés - como Caura, Cuchivero y Orinoco -, posiblemente de un manto espeso de alteración, derivado de las rocas ígneas y metamórficas del escudo [58].

Los horizontes superficiales están fuertemente lixiviados, tienen poca cohesión y son fácilmente movilizables por el escurrimiento difuso. El material arenoso lavado es arrastrado, acumulándose en pequeñas depresiones. Los sequióxidos de hierro y las pocas cantidades de arcillas contenidas en los horizontes superficiales del material de la Mesa, han sido acumuladas en un horizonte B de color marrón rojizo [58].

2.1.4 SUELOS

Los suelos que predominan en gran parte del área bajo estudio pertenecen al conjunto de la Mesa de Guanipa, con predominio de los órdenes Ultisoles, Oxisoles y Entisoles. Son suelos evolucionados, de pH ácidos, muy bajos contenidos de materia orgánica y de baja fertilidad, hacia el oeste del sector existe en posiciones más bajas, suelos con mejor aptitud agrícola bajo una topografía ondulada, pues en el resto del área los suelos tienen más vocación forestal y pecuaria ^[58].

Los suelos son predominantemente arenosos en los primeros 40 cm y luego presentan un incremento de arcilla (Kandiustults). La estructura es generalmente de grano simple hasta de bloque subangular débil a media. El drenaje va desde excesivamente drenado para los suelos arenosos hasta bien drenado en los suelos de textura media. Poseen bajas capacidad de intercambio iónico, de saturación de bases, de materia orgánica y de retención de humedad ^[58].

2.1.5 VEGETACIÓN

La vegetación es típica de una sabana, con dominio de vegetación herbácea en las planicies, con especies como *Trachypogon*, *Axonopus sp* y *Bulbostylis sp*. Y de especies arbóreas como chaparro, alcornoque y manteco.

Luego de establecidas la ubicación y las características predominantes de la zona de estudio, se fijaron las metodologías a utilizar en el muestreo de campo y en los análisis químicos de laboratorio, con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos en el presente trabajo.

2.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental se desarrolla en varias etapas, que involucran en primer lugar el trabajo de campo y en segundo lugar el análisis de laboratorio.

2.2.1 EN CAMPO

En el campo se realizó la delimitación de la zona, distribución de parcelas dentro de una hectárea de terreno y la toma de muestras aleatorias.

2.2.1.1 DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS

Una vez ubicada el área escogida para el muestreo, se procedió a delimitar una hectárea (10.000 m²), la cual fue subdividida en 100 parcelas de 10 por 10 m² cada una, correspondientes a las unidades de muestreo. Se realizó un sorteo aleatorio para escoger las parcelas a ser muestreadas. La Figura 7, muestra de forma esquemática la distribución del muestreo en campo, resaltando las parcelas que fueron seleccionadas para la toma de muestras. De las parcelas coloreadas, se tomaron para este trabajo: las parcelas P38, P64, P87, P47, P41, P2, P37, P26 y P37.

2.2.1.2 MUESTREO

Se tomaron muestras de columnas de suelo o monolitos (utilizando un pico y una pala) de aproximadamente 1Kg, correspondientes a los primeros 15cm de profundidad en puntos aleatorios de las parcelas delimitadas, tratando de perturbar lo menos posible al suelo y tener su representación tal como se encontraba en campo. Igualmente se realizaron las descripciones pertinentes en los casos donde se observaron diferencias significativas con el resto del terreno (hormigueros, cenizas, etc.). Luego de extraer los

monolitos, éstos fueron colocados en envases plásticos, previamente lavados y provistos de orificios para el drenaje. Una vez contenidas las muestras en el interior de los envases, se cubrieron con plástico (con agujeros para permitir su aireación) y se colocaron en cestas, para su traslado al laboratorio, donde se realizó el trabajo de incubación y muestreo para los análisis químicos.

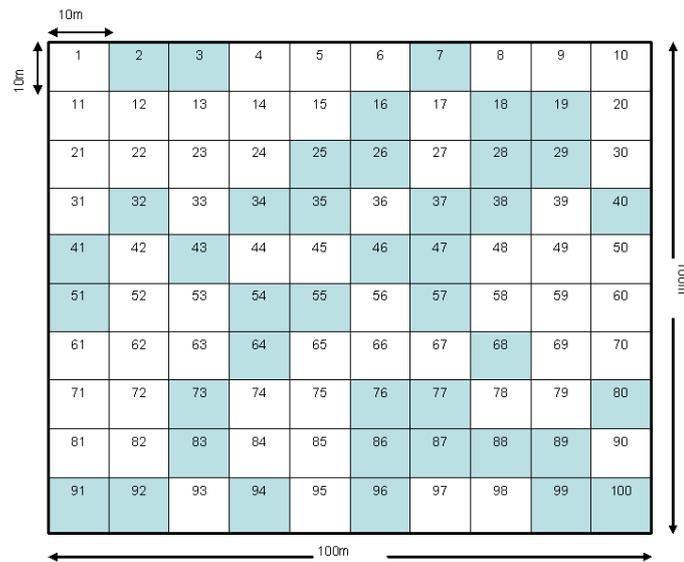


Figura 7. Distribución espacial del muestreo de campo.

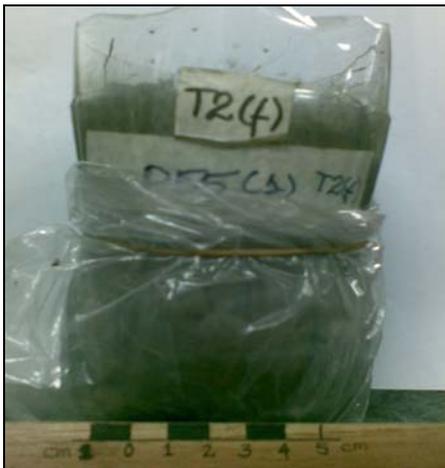


Figura 8. Monolito de 15 cm. de profundidad y 6 cm. de ancho aproximadamente.

2.2.2 EN EL LABORATORIO

Los monolitos muestreados se aclimataron a las condiciones del laboratorio y luego se trataron con la emulsión asfáltica y la roca fosfórica.

2.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMULSIONES Y DE LA ROCA FOSFÓRICA

Las emulsiones asfálticas catiónicas y aniónicas fueron suministradas por la industria petrolera (PDVSA-INTEVEP) en el marco del proyecto U.C.V.-INTEVEP N° 2005-00051/2005-019. Se caracterizan por ser de rompimiento lento, por un contenido de asfalto comprendido entre 50-70 % y por una densidad que oscila entre 1.02 y 1.1 g/mL. Estas emulsiones son provenientes del Crudo Boscan suministrado por industrias IPA ubicadas en Maracay- Edo. Aragua ^[60].

Cabe destacar que se estableció como dosis única para los tratamientos: 1,5 t/ha para ambas emulsiones y para la roca fosfórica una dosis de 100 ppm de P. Esta roca fosfórica presenta una fórmula de 0 (N) – 26 (P₂O₅) – 0 (K) (El contenido de fósforo de esta roca fue determinado en el presente trabajo: Anexo 15) y fue incorporada al suelo una vez aplicada la emulsión.

2.2.2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL (TRATAMIENTOS)

Se procedió con el tratamiento de los monolitos traídos de campo. Seis de ellos fueron incubados en un lapso de 60 días, con (y sin) la emulsión respectiva a razón de la dosis mencionada anteriormente. Posteriormente otros nueve monolitos fueron incubados en un lapso de 15 días, con (y sin) las emulsiones pero esta vez con una aplicación adicional de roca fosfórica. Así pues, el diseño experimental quedó conformado de la siguiente manera:

Tabla 2. Diseño experimental.

Tiempo de incubación	Tratamientos	Tipo de emulsión	Número de réplicas
Sin incubar	SN	0	3
Experimento 1 sin roca (60 días)	SC ₆₀	0	2
	SEC	EC	2
	SEA	EA	2
Experimento 2 Con roca (15 días)	SC ₁₅	0	2
	SR	RF	2
	SREC	RF + EC	2
	SREA	RF + EA	3

EA= Emulsión Aniónica; EC= Emulsión Catiónica; RF = Roca fosfórica

Se tomaron en cuenta los tratamientos SN= Sabana natural, SC₆₀= Suelo control incubado 60 días, SEC= Suelo incubado con EC, SEA= Suelo incubado con EA, SC₁₅= Suelo control incubado 15 días, SR= Suelo incubado con roca (control roca), SREC= Suelo incubado con RF y EC y por último SREA= Suelo incubado con RF y EA (Tabla 2). Los tratamientos SC₆₀, SEC, SEA, SC₁₅, SR, SREC y SREA tenían un duplicado cada uno (exceptuando el último) y el suelo de sabana sin tratar tenía un triplicado, para dar un total de 18 columnas, donde 15 de ellas fueron sometidas a régimen de riego para mantener el 60 % de la capacidad de campo. Culminado el tiempo de incubación de las muestras se realizó el muestreo y los análisis de laboratorio correspondientes.

2.2.2.3 PRE-TRATAMIENTO DE LA MUESTRA Y MÉTODOS DE ANÁLISIS EN EL LABORATORIO

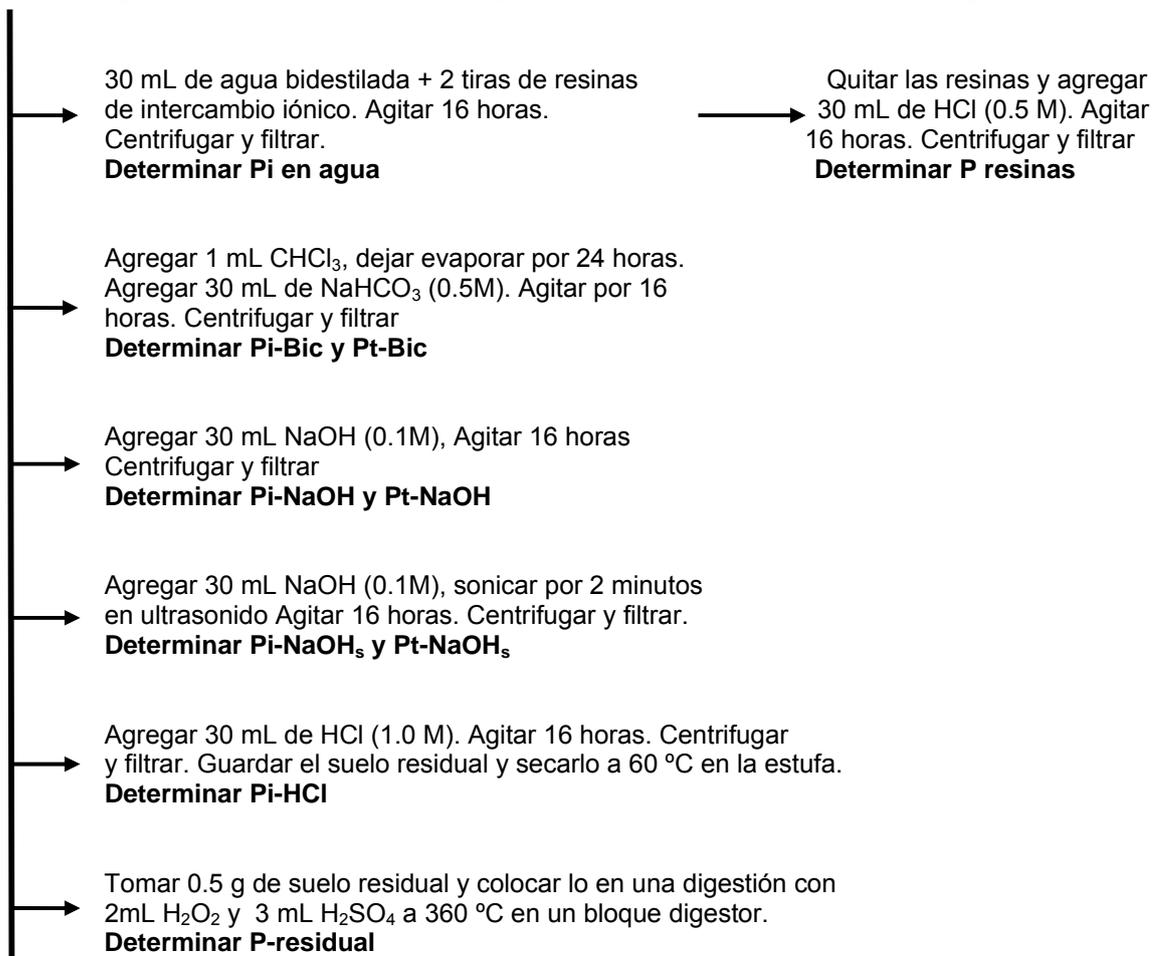
Se tomaron muestras de 150 g aproximadamente de cada monolito. Se homogenizaron, cuartearon y tamizaron (en seco) las muestras por una malla < 2 mm. Luego se pesó la cantidad de muestra necesaria para realizar los análisis químicos respectivos. Las metodologías a utilizadas se presentan a continuación:

Metodología de Hedley et al (1982) modificada por Ojeda y López-Hernández (1994) ^[61]

Luego del pre-tratamiento al que fueron sometidos los suelos, se llevó a cabo el siguiente esquema experimental, para la obtención de las distintas fracciones de fósforo. Las resinas utilizadas presentan un porcentaje de recuperación del 94 % de P (Anexo 14).

P fumigado

Se pesó 2 g de suelo (Tamiz: 250 μ m) y se colocó en un tubo de centrifuga de 45 mL



P no fumigado

Se pesó 2 g de suelo (Tamiz: 250µm) y colocó en un tubo de centrifuga de 45 mL

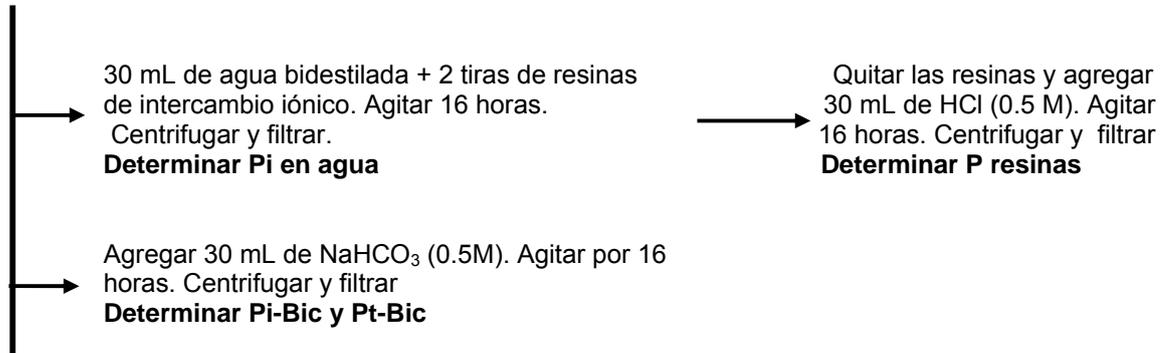
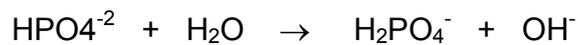


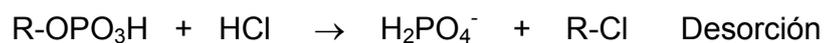
Figura 9. Metodología de fraccionamiento de fósforo (P) de Hedley et al., (1982) modificada por Ojeda y López-Hernández, (1994) ^[61].

El fraccionamiento químico se basa en la extracción secuencial de los fosfatos presentes en los minerales del suelo gracias a la capacidad que tienen ciertos reactivos de solubilizarlos. Las reacciones involucradas son las siguientes:

A.- Fósforo en agua disponible (P_{agua}):



B.- Fósforo en resina intercambiable (P_{resina}):

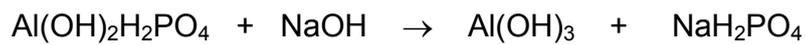


Donde R-OH es el sitio potencial del coloide para la adsorción

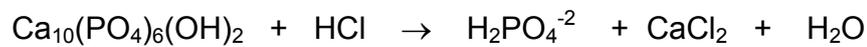
C.- Fósforo en bicarbonato (P_{NaHCO_3}):



D.- Fósforo en Hidróxido (P_{NaOH}):



E.- Fósforo en ácido (P_{HCl}):



F.- Fósforo de digestión (P_{residual}):



Donde se encuentran las formas más ocluidas de P tratadas con digestión ácida.

Floculación en las fracciones para obtener el fósforo inorgánico

La floculación consistió en precipitar con ácido sulfúrico la materia orgánica presente en los extractos de NaHCO_3 e NaOH . Dicha materia orgánica es la responsable de la coloración de los mismos (Tiessen y Moir, 1993)^[50], por lo que queda

en solución el fósforo inorgánico disponible (Pi), que se mide con el método colorimétrico reportado.^[63]

Luego de conseguidas las fracciones de fósforo, en especial las de Po (Hedley et al modificado por Ojeda y López-Hernández)^[61] y P total (Olsen y Sommers, 1982)^[62], se realizó la determinación cuantitativa de cada fracción de fósforo por medio del método de Murphy y Riley (1962)^[63].

Análisis de fósforo total (Pt) por metodología de Olsen y Sommers (1982)

El experimento consistió en pesar 1 g de muestra y colocarla en tubos para digestión. Se le añadió seguidamente 2 mL de solución binaria^[62] (mezcla de H₂SO₄ + HClO₄ + V₂O₅) a cada tubo y luego se sometió a una digestión durante 2 horas con temperatura controlada (150-180 °C). Pasado este tiempo y enfriados los tubos, se lavaron los residuos de la digestión con agua destilada, y por medio de la técnica de filtración por gravedad se transvasó la solución a balones de 50 mL, llevándolos a enrase. Finalmente, a alícuotas de estas soluciones se les determinó el P por colorimetría^[63].

Análisis de fósforo orgánico (Po) por la metodología de Saunders y Williams (1955) modificada por Walker y Adams (1958)

El fósforo orgánico es estimado utilizando ácido sulfúrico 1 M, donde el fósforo extraído de una muestra de suelo con ignición a 550 ° C y el fósforo extraído de una muestra de suelo sin ignición son restados para obtener el Po.

Esta metodología se realizó colocando 1 g de suelo (Tamiz: 250 μ m) en un crisol de porcelana y este crisol fue llevado a una mufla a 550 °C durante una hora, luego se dejó enfriar y se transfirió el suelo con ignición a unos tubos de centrifuga de 50 ml. En otro tubo de centrifuga se colocó un gramo de muestra sin tratar (sin ignición). Se les adicionó a ambos suelos 50 ml de H₂SO₄ 1 M, se agitó estos tubos durante 16 horas, se centrifugó a 2000 rpm, se filtró y se enrazó a 50 ml, para su posterior medición por colorimetría ^[64].

Análisis de fósforo total (Pt) en la roca fosfórica

La extracción del P total en la RF se realizó por incineración de 1g de RF a 500°C por más de 8 horas, luego las cenizas fueron disueltas en 5mL de HCl concentrado y diluidas en agua destilada. Las mediciones fueron realizadas por fotocolorimetría.

Además, de la determinación de fósforo, se determinó la cantidad de carbono (C) a todos los tratamientos, para la subsecuente evaluación de las reacciones de mineralización e inmovilización, por medio de las relaciones C/P_o.

Análisis de carbono (C) en las muestras

Se determinó a través del método de Walkley- Black ^[65], por oxidación de la materia orgánica, utilizando dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Dicho método se basa en que la cantidad de carbono que se oxida es equivalente a la cantidad de iones dicromato reducidos, pudiendo determinarse estos últimos por colorimetría debido al cambio de color (de naranja Cr⁺⁶ a verde Cr⁺³). El esquema experimental se muestra a continuación:

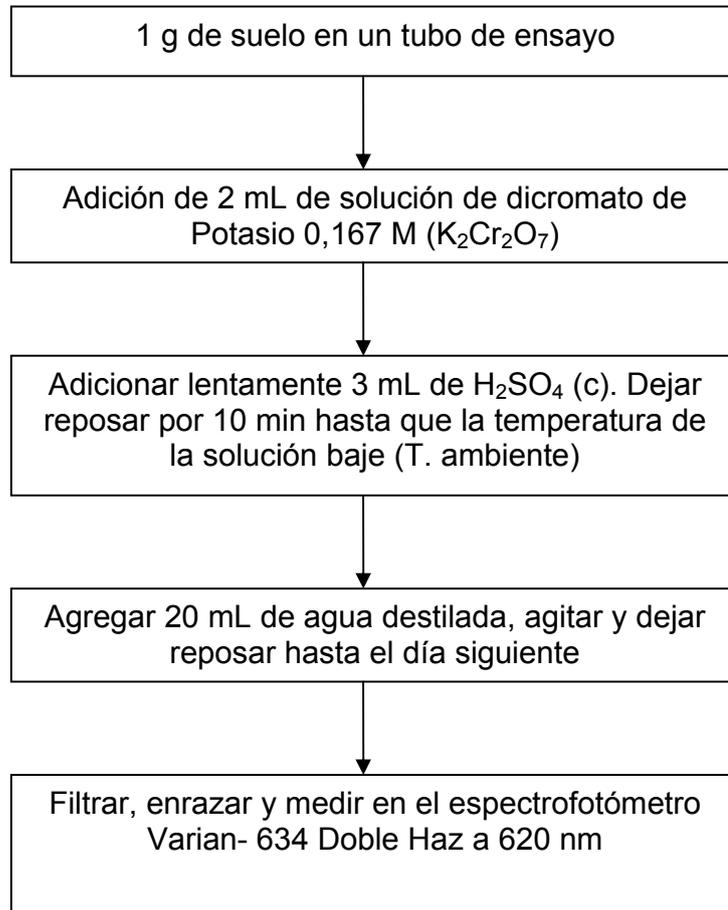


Figura 10. Esquema experimental para la determinación de carbono ^[65].

2.2.3 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

En este trabajo de investigación se exploraron las variaciones de la fracciones de fósforo orgánico en un suelo ácido de sabana (Ultisol), debido a la presencia de las emulsiones asfálticas sobre el mismo, por lo que se aplicó para tal fin, la prueba estadística del ANOVA (de una vía) para todo el conjunto de datos obtenidos de la metodología experimental a aplicar y así más tarde, determinar diferencias entre las medias por medio de la prueba DUNCAN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se mostraran tanto los resultados de los experimentos 1 y 2, como de los demás ensayos realizados. Con esto, se permitirá interpretar y analizar la distribución de las formas de fosforo en el suelo (fraccionamiento), comparar entre metodologías de estimación de Po y examinar tres efectos: 1) efecto de la emulsión sobre el suelo, 2) efecto de la roca fosfórica sobre el suelo y 3) efecto de la emulsión sobre el suelo (tratado con RF).

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO ULTISOL ESTUDIADO

Caracterización física, química y mineralógica del suelo en estudio.

Tabla 3. Caracterización inicial del suelo. Tomado de Agüero y Morales ^[66] y ^[67].

Física		
Textura	Areno francosa	
% de Arena	88	(± 1)
% de Limo	6	(± 1)
% de Arcilla	6	(± 1)
Capacidad de campo mL por 30g de suelo	9	(± 1)
% de Macroagregados estables al agua	87	(± 1)
% de Microagregados estables al agua	13	(± 1)
% de Retención de humedad a 1/10 bar	12,31	(± 0,08)
% de Retención de humedad a 1/3 bar	9,14	(± 0,09)
% de Retención de humedad a 15 bar	2,92	(± 0,09)
Química		
pH	4,84	(± 0,01)
Δ pH	-0,66	(± 0,01)
Al cambiante (meq/100g)	0,15	(± 0,01)
% N total	0,02	(± 0,01)
CIC fracción menor <0,063mm (meq/100g)	15,7	(± 0,1)
CBC fracción menor <2mm (meq/100g)	1,20	(± 0,03)
Mineralógica		
Difracción de rayos X	Caolinita y cuarzo	

La Tabla 3 muestra que el suelo estudiado es areno-francoso, de pH ácido (4,84), de baja retención de humedad, bajo contenido de nitrógeno y bases cambiables. Este suelo se ha caracterizado como un suelo Ultisol (Kandiustults), compuesto de los minerales caolinita y cuarzo, presenta buen drenaje y en consecuencia, es poco apto para la actividad agrícola ^[66] y ^[67].

Los contenidos de materia orgánica y P no se encuentran en esta tabla debido a que fueron analizados por separado para cada tratamiento, estos serán mostrados en las secciones siguientes.

3.2 FRACCIONAMIENTO DE P

Una manera conveniente de realizar una revisión completa acerca de lo que está sucediendo en el suelo con respecto al elemento esencial P, es realizando un fraccionamiento secuencial, donde todas las formas de fósforo puedan analizarse por separado y en conjunto, determinando por esta vía la movilidad de las distintas fracciones de P en el suelo, como su comportamiento ante la adición de fertilizantes o enmiendas que puedan favorecer la disponibilidad del fósforo hacia las plantas.

De esta manera el fraccionamiento fue realizado a los tratamientos de ambos experimentos y a la sabana natural, tomando para ello los primeros 5 cm de profundidad del suelo, ya que, según Sharpley ^[68] este estrato recibe los mayores aportes de MO y en él, ocurren las transformaciones de P en mayor grado.

Para el caso del experimento 1 (suelo incubado por 60 días), los resultados obtenidos para los diferentes tratamientos (SC₆₀, SEC y SEA) fueron muy similares (Tabla 4), observando solo ligeras variaciones estadísticamente significativas en las fracciones de Bi-Pi, HCl-Pi y P microbiano.

Aunque en la mayoría de las fracciones, no existen diferencias significativas entre los tratamientos de emulsión y su control, se puede observar en la Tabla 4 que los valores de los tratamientos con emulsiones (SEC y SEA) presentan un ligero incremento en la mayoría de las fracciones orgánicas de fósforo –respecto al tratamiento control-, lo que indica una tendencia general al aumento de la cantidad de fósforo orgánico cuando las emulsiones asfálticas son añadidas (aunque no presentan significancia). Tal vez una aplicación de 1.5 t/ha como dosis de emulsión no sea suficiente para obtener resultados significativos de cambios apreciables en las fracciones de fósforo.

Sin embargo, al parecer la incubación del suelo sabana natural durante 60 días (SC₆₀) permite una mayor movilización de fósforo que la incubación del suelo en presencia de las emulsiones (SEC y SEA). Esto se puede apreciar, al comparar, las fracciones P resina, NaOH-Po, Bi-Po, Bi-Pi, y P residual del tratamiento SC₆₀, respecto a la sabana natural (SN), donde en las tres primeras se observa una disminución apreciable de los valores de fósforo, aunque no llega a alcanzar significancia.

En los suelos que presentan un grado de meteorización apreciable, como el de esta sabana natural, la fracción de Pi-HCl se encuentra en baja proporción ^[69]. Esto se observa en la fracción de Pi.HCl donde los valores se estiman entre 1-2.4 ppm de P.

Para la determinación del fósforo microbiano se realizó una extracción con bicarbonato, donde la incorporación de un agente biocida (cloroformo) permitió generar lisis celular y liberar la fracción de fósforo retenida por los microorganismos. Hedley et al. ^[30] determinó que el P microbiano es obtenido como la diferencia de las fracciones de P i-Bi con cloroformo y la fracción de Pi-Bi. De esta manera los bajos valores de P microbiano indican la escasa actividad biológica de este suelo.

Tabla 4. Fraccionamiento secuencial de P para el experimento 1 (Hedley et al.)

Fraccionamiento secuencial de P ($\mu\text{g/g}$)	SN	Experimento 1		
		SC	SEC	SEA
<u>P inorgánico</u>				
H ₂ O-Pi	0,6 (\pm 0.4)a	0,6 (\pm 0.4)a	0,7 (\pm 0.4)a	0,7 (\pm 0.5)a
P resina	1,5 (\pm 0.2)a	1,1 (\pm 0.2)b	0,9 (\pm 0.2)b	1,1 (\pm 0.3)b
Bic-Pi	0,4 (\pm 0.1)a	0,7 (\pm 0.5)b	0,2 (\pm 0.1)b	0,2(\pm 0.05)b
NaOH-Pi	4 (\pm 1)a	3 (\pm 1)a	4,2 (\pm 0.9)a	4,3 (\pm 0.4)a
NaOHs-Pi	0,5 (\pm 0.3)a	0,9 (\pm 0.3)a	1,0 (\pm 0.6)a	1,1 (\pm 0.3)a
HCl-Pi	1,8 (\pm 0.7)a	2,4 (\pm 0.4)a	1,6 (\pm 0.4)b	1,0 (\pm 0.4)b
Fracciones Pi total	8,5 (\pm0.4)a	9 (\pm1)a	8,6 (\pm0.3)a	8,5 (\pm0.6)a
<u>P orgánico</u>				
Bic-Po	6 (\pm 1)a	4 (\pm 1)a	5 (\pm 1)a	5 (\pm 1)a
NaOH-Po	33 (\pm 4)a	28 (\pm 6)b	30 (\pm 5)b	34 (\pm 5)a
NaOHs-Po	4 (\pm 1)a	3 (\pm 1)a	4 (\pm 1)a	4 (\pm 1)a
Fracciones Po total	42(\pm8)a	36 (\pm4)a	39 (\pm2)a	42 (\pm2)a
<u>P residual</u>				
Pt (suma de todas las fracciones)	10 (\pm 2)a	16 (1)a	15 (\pm 1)a	11 (\pm 2)a
Bn	0,2 (\pm 0.1)a	0,1 (\pm 0.1)a	0,3 (\pm 0.1)a	0,4 (\pm 0.2)a
P microbiano	0,50 (\pm 0.09)a	0,61 (\pm 0.09)a	0,3 (\pm 0.3)b	0,4 (\pm 0.4)b

EC: Emulsión catiónica; EA: Emulsión aniónica

Promedio seguido de letras diferentes: diferencias significativas respecto a tratamientos

Es importante señalar que el fósforo residual para ambos experimentos fue determinado como la diferencia del Pt menos la sumatoria de las fracciones de P, debido a las limitaciones generadas por el equipo digestor utilizado.

Tiessen y Cole ^[31] y Sharpley ^[68], al igual que otros autores, han señalado que la adición de fósforo en un suelo altamente meteorizado usualmente incrementa la fracción inorgánica y total de P más que la orgánica, lo cual se corresponde con el

comportamiento del experimento 2 (Tabla 5), donde se aprecia efectivamente un aumento del 741.6 % de P_i y de 227.8 % de P_T cuando se le añade la RF al suelo.

Cabe destacar que el incremento de las cantidades de P_i son atribuidas principalmente a las fracciones más lábiles de P resina, P_i -Bi y NaOH- P_i , así como también al P_i -HCl y a la fracción de P residual. Como era de esperarse, al adicionar la RF al suelo, un incremento de la fracción de P_i -HCl es notoria debido a que la roca adicionada es principalmente apatita y este extractante (HCl) remueve el P de minerales primarios de tipo apatito ^[70] junto con la fracción de P ocluido en los suelos más meteorizados ^[71].

Debido a que fue tomada en cuenta la modificación de Ojeda y López-Hernández se pudo observar un aumento significativo de la fracción (P_i -H₂O), ya que al adicionar la RF al suelo este valor fue 34 veces mayor que sin RF. A pesar de este incremento, esta fracción es bastante susceptible a perderse por lixiviación, debido a las propiedades de textura arenosa del suelo.

En la Tabla 5, las fracciones resina, bicarbonato, NaOH y HCl, pertenecientes al pool de P_i total de los tratamientos con emulsiones (SREC y SREA) presentan diferencias significativas –respecto al control (SR)-, pudiendo identificar que en las dos primeras fracciones (P_i -resina y P_i -Bic) ocurre una disminución del contenido de P, mientras que en las fracciones restantes (NaOH- P_i y HCL- P_i) ocurre lo contrario.

Por otro lado, las fracciones que presentan significancia para las formas orgánicas de P son la de Bi e NaOHs, las cuales presentaron un incremento de casi el doble, respecto al control, lo que es corroborado por Morales ^[67] y Herrera ^[60], las cuales indicaron que una disminución en la adsorción de P cuando la emulsión es añadida antes que la roca fosfórica. Según Sharpley ^[68] esta última fracción (NaOHs)

es la forma que representa en parte una estimación a largo plazo de la fertilidad fosfórica del suelo.

La selección de la extracción con bicarbonato ^[30], se debe a su capacidad para remover formas lábiles de Pi y formas de Po fácilmente mineralizables, que pueden ser inmovilizadas por los microorganismos. Bowman y Cole ^[39], indican que el Po extraído con bicarbonato de sodio es fácilmente mineralizable y contribuye con las formas de P disponible para las plantas. Por lo que un incremento en las fracciones orgánicas debido a la presencia de las emulsiones (EC y EA) en el suelo, resulta favorable para el desarrollo de las plantas.

Los resultados muestran que los valores en las distintas fracciones que se encuentran en el suelo aumentan conforme ocurre una disminución de P en resina y del P residual, por lo cual en el experimento 2, sí se experimentan cambios representativos en la movilidad del fósforo en el suelo, indicados por la presencia de las emulsiones. Esta última discusión permite entender que la adición de algún fertilizante, bien sea orgánico o roca, es necesaria, para que ocurra movilidad del P en el suelo, así como los procesos de transformación del P; cuando se experimenta con tiempos de incubación cortos.

Por otro lado se observa que el contenido de P microbiano se ve levemente favorecido por la adición de las emulsiones y que para el caso del suelo control SR el valor es negativo. Este valor negativo es reportado también por Potter y col. ^[72], quienes explicaron que este hecho puede deberse a: a) El secado al aire libre, pulverizado y el tamizado de la muestra puede generar lisis celular y el P liberado puede convertirse en otras fracciones diferentes a las extraíbles con bicarbonato, con la consecuente subestimación del pool microbiano, b) los productos liberados de la lisis con cloroformo pueden dirigirse hacia fracciones más resistentes de fósforo, con las mismas consecuencias anteriores. Esta aseveración b) posiblemente es la que ocurrió para el

caso del control SR, ya que todos los tratamientos fueron tratados de igual forma en cuanto a los procesos de tamizado, secado, etc.

Tabla 5. Fraccionamiento secuencial de P para el experimento 2 (Hedley et al.)

Fraccionamiento secuencial de P ($\mu\text{g/g}$)	SC	Experimento 2		
		SR	SREC	SREA
<u>P inorgánico</u>				
H ₂ O-Pi	0,1 (± 0.1)a	3,4 (± 0.6)b	2,2 (± 0.8)b	2,2 (± 0.7)b
P resina	1,6 (± 0.4)a	30,2 (± 0.8)b	27 (± 1)c	27 (± 1)c
Bic-Pi	1,7 (± 0.7)a	16,0 (± 0.7)b	15,2 (± 0.6)c	15,3 (± 0.7)c
NaOH-Pi	6 (± 2)a	15 (± 3)b	18 (± 3)c	19 (± 3)c
NaOHs-Pi	0,0(± 0.0)a	1,2 (± 0.2)b	1,2 (± 0.2)b	1,2 (± 0.2)b
HCl-Pi	2,9 (± 0.6)a	27,4 (± 0.7)b	30 (± 2)c	28 (± 2)c
Fracciones Pi total	13 (± 1)a	93 (± 2)b	93 (± 1)b	92 (± 2)b
<u>P orgánico</u>				
Bic-Po	5,5 (± 2.9)a	5.9 (± 1.5)b	10,5 (± 2.7)c	12,2 (± 3.5)c
NaOH-Po	30 (± 2)a	23 (± 5)b	22 (± 3)b	21 (± 3)b
NaOHs-Po	3 (± 1)a	3 (± 1)b	5,2 (± 0.9)c	5,0 (± 0.7)c
Fracciones Po total	38 (± 1)a	32 (± 2)a	38 (± 1)a	38 (± 1)a
<u>P residual</u>	12.2 (± 0.5)a	40 (± 2)b	23 (± 3)c	26 (± 2)c
Pt (suma de todas las fracciones)	63(± 5)a	154 (± 6)b	154 (± 9)b	157 (± 10)b
Bn	0,5 ($\pm 0,1$)a	18 (± 1)b	14 (± 1)b	15 (± 1)b
P microbiano	0,9 ($\pm 0,1$)a	-1,1 ($\pm 0,2$)a	1,3 ($\pm 0,2$)a	0,8 ($\pm 0,1$)a

EC: Emulsión catiónica; **EA:** Emulsión aniónica; **SN:** sabana natural

Promedio seguido de letras diferentes: diferencias significativas respecto a tratamientos

Cabe destacar, que si bien el hecho de añadir las emulsiones genera cambios en las fracciones del suelo, no se obtuvo diferencia alguna entre los dos tipos de emulsión a esta dosis añadida de 1,5 t/ha.

Por último, una observación importante acerca de los controles (SC₁₅ y SC₆₀) respecto a la sabana natural (SN), indica que a los 15 días de incubación el control

SC₁₅ presenta cambios variables (estadísticamente no significativos) en las fracciones inorgánicas de P produciéndose un incremento de las mismas y verificando de esta manera, un posible proceso de mineralización donde las fracciones orgánicas pasan a sus formas inorgánicas más disponibles. Este último hecho difiere del comportamiento del control SC₆₀, en el cual las cantidades de Pi disminuyen nuevamente, en algunos casos, incluso, por debajo de los valores de la SN. Esto permite inferir, que la movilidad del P, al parecer, depende del tiempo de incubación.

3.3 FÓSFORO ORGÁNICO

Para la estimación del Po se utilizaron dos metodologías: el método de Extracción de Hedley (1982) modificado ^[61]. y el método de ignición de Saunders y Williams (1955) modificado ^[64]. El segundo método se realizó con la intención de hallar la relación C/Po y de realizar una comparación de metodologías de obtención de fósforo orgánico.

El procedimiento de ignición es mucho más simple, menos laborioso, y más preciso que los métodos de extracción para estimar el Po en suelos. Sin embargo, este está sujeto a un mayor número de errores que los procedimientos de extracción, resultando en estimaciones más bajas o en sobreestimaciones del Po dependiendo de las propiedades del suelo analizado ^[64].

A causa del potencial para desestimar o sobreestimar el Po, el procedimiento de ignición no es recomendado para determinar el Po cuando el objetivo de estudio es comparar el Po que contienen diversos suelos ^[64]. Sin embargo, el método de ignición es más apropiado para análisis de rutina que los procedimientos de extracción y es viable para monitorear los cambios en el Po durante estudios de campo y de laboratorio donde el mayor objetivo es comparar tratamientos de un suelo con su control, como es el caso acá estudiado.

Tabla 6. Estimación del Po (ppm) para el experimento 1 por ambas metodologías.

TRATAMIENTO	Tipo de emulsión	PO (Saunders and Williams)	Hedley et al.		
			Fracciones Po		PoT
SN*	Sabana natural	47 (± 4) a,A	Bic-Po	5,5	42 (± 8) a,A
			NaOH-Po	32,6	
			NaOHs-Po	3,7	
SC°	Sin emulsión	44 (± 6) a,A	Bic-Po	4,4	36 (± 4) a,A
			NaOH-Po	27,7	
			NaOHs-Po	3,4	
SEC°	EC	44 (± 3) a,A	Bic-Po	4,9	39 (± 2) a,A
			NaOH-Po	29,8	
			NaOHs-Po	4,0	
SEA°	EA	43,8 (± 0.6) a,A	Bic-Po	4,9	42 (± 2) a,A
			NaOH-Po	33,5	
			NaOHs-Po	4,1	

* sin incubación; ° 60 días

Promedios seguidos de la misma letra minúscula: diferencias no significativas respecto a tratamientos

Promedios seguidos de la misma letra mayúscula: diferencias no significativas respecto a métodos.

En lo que concierne al contenido de Po en el suelo de sabana analizado, la literatura nacional reporta valores cercanos a los presentados en este trabajo (Tablas 6 y 7). Algunos de estos suelos se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Valores de Po (ppm) reportados por distintos autores. Incluye el estimado en este trabajo.

Autores	Romero ^[35]	Hernández ^[43]	López Contreras ^[48]	Hernández y Bautis ^[52]	Este trabajo
Zona de estudio	La Iguana Guárico	Calabozo Guárico	Sabanas de Amazonas	Uverito Monagas	Pariaguán Anzoátegui
Valores	3	41.9-65.5	54.3-59.4	19.2	41.8

Tabla 7. Estimación del Po (ppm) para el experimento 2 por ambas metodologías.

TRATAMIENTO	Tipo de emulsión	PO (Saunders Y Williams)	Hedley et al.		
			Fracciones Po		PoT
SC	Sin E + Sin RF	50 (± 8) a,A	Bic-Po	5,5	38 (± 3) a,A
			NaOH-Po	29,6	
			NaOHs-Po	3,1	
SR °	Sin E + Con RF	41 (± 8) a,A	Bic-Po	5,9	32 (± 2) a,A
			NaOH-Po	23,4	
			NaOHs-Po	2,5	
SREC°	EC + RF	47 (± 5) a,A	Bic-Po	10,5	38 (± 4) a,A
			NaOH-Po	22,0	
			NaOHs-Po	5,2	
SREA°	EA + RF	48 (11) a,A	Bic-Po	12,2	38 (± 1) a,A
			NaOH-Po	21,0	
			NaOHs-Po	5,0	

° 15 días

Promedios seguidos de la misma letra minúscula: diferencias no significativas respecto a tratamientos

Promedios seguidos de la misma letra mayúscula: diferencias no significativas respecto a métodos.

Ahora bien, aunque el método de ignición es mucho más sencillo que el de extracción y es considerado como un método estándar, puede llegar a sobreestimar el Po al solubilizar otras formas de Pi como el P mineral ^[41].

Al observar las Tablas 6 y 7, se puede decir que esta última consideración puede ser válida para el presente caso. Hernández- Valencia ^[43], compara tres métodos de estimación de Po, concluyendo que este método de ignición efectivamente puede liberar a la solución extractora el fosforo inorgánico que se encontraba formando parte de la matriz del suelo y en consecuencia ocurre una sobreestimación del Po, lo que produce diferencia en los valores de Po con respecto a los métodos de Hedley et al. (1982), Bowman y Cole (1978) y Bowman (1989).

Para el caso de este trabajo no existen diferencias significativas entre ambos métodos (Saunders y Williams y Hedley et al.), mas si una variabilidad apreciable en los valores de Po, resultando que puede explicarse por lo anteriormente mencionado.

Un dato interesante que se revela de la metodología de fraccionamiento de Hedley et al., es que el Po en este suelo se debe principalmente a las fracciones extraídas con álcali (NaOH 0,1 M), el cual es aquel ligado por quimiosorción al hierro y aluminio de las superficies del suelo ^[61], lo que es característico de los suelos Ultisol.

3.4 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN CADA TRATAMIENTO

La función de la materia orgánica es clara en cuanto a que favorece la retención de agua y a que su degradación brinda a la planta elementos esenciales tales como el P ^[21]. Al observar los bajos valores de la materia orgánica de la Tabla 8, correspondientes a los tratamientos para el experimento 1 y para el experimento 2, se puede explicar los bajos contenidos de P en los suelos incubados y se puede explicar además, aunque no represente la razón principal por tratarse de un suelo arenoso, la baja retención de humedad que presenta este suelo Ultisol.

Tabla 8. Contenido de materia orgánica para los suelos tratados (experimentos 1 y 2)

TRATAMIENTO	Tipo de emulsión	% MO
SC	Sin emulsión	0,64 (± 0.03) a
SEC	EC	0,62 (± 0.06) a
SEA	EA	0,66 (± 0.04) a
SC	Sin E + Sin RF	0,6 (± 0.1) a
SR	Sin E + Con RF	0,70 (± 0.2) a
SREC	EC + RF	0,72 (± 0.09) a
SREA	EA + RF	0,7 (± 0.1) a

MO: Materia orgánica

No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las cantidades de MO por lo que no existe influencia alguna de las emulsiones asfálticas -a una dosis de 1,5 t/ha- sobre el porcentaje de materia orgánica.

Tomando en cuenta que este suelo corresponde a un suelo ultisol, se evidencia un contenido de materia orgánica ajustado a los valores estándar para este, valores estos, ubicados entre 0.5 y 1 % ^[73].

3.5 RELACIÓN C/P_o

Con el fin de complementar esta investigación en la que el fosforo orgánico es el principal objetivo, se realizaron estudios sobre las cantidades de Co presentes en las muestras de suelo control y tratamientos, para luego correlacionar estas concentraciones de Co con los valores de Po - determinados por la metodología de Saunders y Williams 1955 modificado- y dar así, indicios acerca de los procesos de mineralización e inmovilización de Po en los suelos analizados. Estas determinaciones de Co y Po fueron obtenidas utilizando un mismo tamaño de partícula de 250 µm.

Aunque la estadística no reporta diferencias significativas (Tabla 9), se observa una ligera tendencia a la disminución del valor C/P_o, cuando las emulsiones entran en contacto con el suelo. Para el caso de este experimento 1, de acuerdo a Enwezor, las reacciones que predominan son las de mineralización, ya que su valor está por debajo de 200.

Tabla 9. Valores de relación C/Po para los tratamientos del experimento 1.

TRATAMIENTO	Tipo de emulsión	C (ppm)	Pi (ppm)	Pt (ppm)	Po (ppm)	C/Po
SN	Suelo sin incubación	4028 (±156) a	9 (±1)	57 (±2) a	47 (±4) a	85 (±6) a
SC	Sin emulsión	3753 (±338) a	8 (±1)	53 (±2) a	44 (±6) a	85 (±3) a
SEC	EC	3623 (±397) a	10 (±1)	53 (±3) a	44 (±3) a	83 (±4) a
SEA	EA	3821 (±434) a	10 (±1)	53 (±3) a	43,8 (±0.6) a	83 (±6) a

EC: Emulsión catiónica; EA: Emulsión aniónica

Promedio seguido de la misma letra: no hay diferencias significativas respecto a tratamientos

Enwezor^[22] sugirió que una magnitud de C/Po menor o igual a 200 corresponde a la mineralización del fósforo orgánico en la materia orgánica, por lo que al comparar este valor con los resultados de la tabla 10 se observó concordancia ($C/Po \leq 200$), evidenciando así un proceso de mineralización en los suelos fertilizados, apreciación que se traduce en una mayor disponibilidad del fósforo. Además, aunque las diferencias estadísticas en este caso tampoco ocurren, si se observa una diferencia apreciable entre los valores C/Po del suelo control con roca y los tratamientos con roca y emulsión en conjunto, ya que los valores de estos últimos son el 12 % menos respecto al tratamiento control, lo que sugiere que cuando las emulsiones son agregadas los procesos de mineralización se aceleran. Estos resultados experimentales se deben al hecho de que la actividad microbiana se incrementa con motivo de la adición de las emulsiones al suelo, lo que determina un posible incremento en la velocidad de mineralización de P.

Tabla 10. Valores de relación C/Po para los tratamientos del experimento 2.

TRATAMIENTO	Tipo de emulsión	C (ppm)	Pi (ppm)	Pt (ppm)	Po (ppm)	C/Po
SR	Sin E + RF	4082 (±164) a	113 (±5) a	154 (±9) a	41 (±8) a	100 (±20) a
SREC	EC + RF	4174 (±156) a	110 (±5) a	157 (±7) b	47 (±5) a	88(±8) a
SREA	EA + RF	4220 (±180) a	108 (±5) a	156 (±10) b	48 (±11) a	88 (±21) a

EC: Emulsión catiónica; EA: Emulsión aniónica; RF: Roca Fosfórica

Letra diferente: diferencias significativas respecto a tratamientos.

Sin embargo, no se observó diferencia alguna entre los dos tipos de emulsión sobre la mineralización del Po, lo que indica que cualquiera de las emulsiones que se añadan al suelo, tendrá el mismo comportamiento respecto a la dinámica del P.

3.6 EFECTO DE LAS EMULSIONES SOBRE LAS FRACCIONES DEL Po.

La importancia del Po radica en que constituye una fracción importante del fósforo total, y que representa una marcada relación con el fósforo disponible ^{[74], [68]} y ^[31]. Generalmente se dice que la fracción del Po representa una fracción variable de entre 2 % y el 75 %, pudiendo alcanzar en algunos casos hasta un 80 % ^[8] como es el caso del suelo en estudio (82 %). Esto permite inferir que la fracción del Po es muy alta en este suelo ultisol.

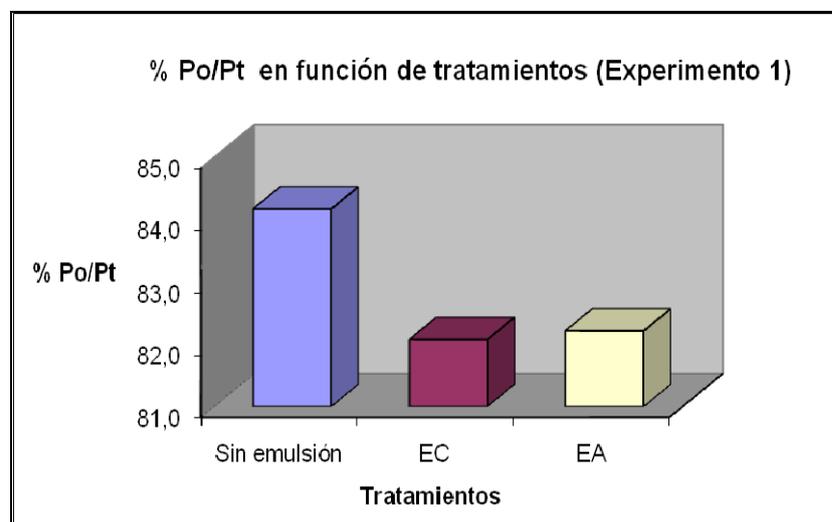
Sin embargo estos porcentajes de Po pueden ser modificados gracias a la acción de enmiendas como las rocas fosfóricas, las cuales como se puede ver en los siguientes gráficos (de acuerdo a la metodología de Saunders y Williams modificada),

permite un incremento en el contenido de Pi desde un 17.7 % hasta un 73,6 %, y una consiguiente disminución del Po desde un 82.3 % hasta un 26.5 %, traduciéndose en un incremento del Pi disponible que requiere la planta.

Ahora bien, para intentar incrementar los valores de Pi disponible se añadieron al suelo otro tipo de enmiendas, las emulsiones asfálticas; los resultados se observan en los gráficos presentados a continuación:

El primer experimento representado por el Gráfico 1 permite generar resultados donde la cantidad de Po se ve disminuida con la adición de las emulsiones en un 2.2 %. Este resultado, aunque bajo resulta en un incremento no significativo de las fracciones de fósforo disponibles, como ya fue mencionado anteriormente.

Gráfico 1. Gráfico representando los valores de % Po/Pt para el experimento 1.



Tablas 11. Tabla correspondiente al gráfico 1.

Tratamientos	Tipo de emulsión	% Po/Pt
SC ₆₀	Sin emulsión	84,2
SEC	EC	82,1
SEA	EA	82,2

Cabe destacar que tanto la emulsión catiónica como la aniónica dieron resultados idénticos para las cantidades de Po reportadas, no habiendo distinción entre ambas emulsiones.

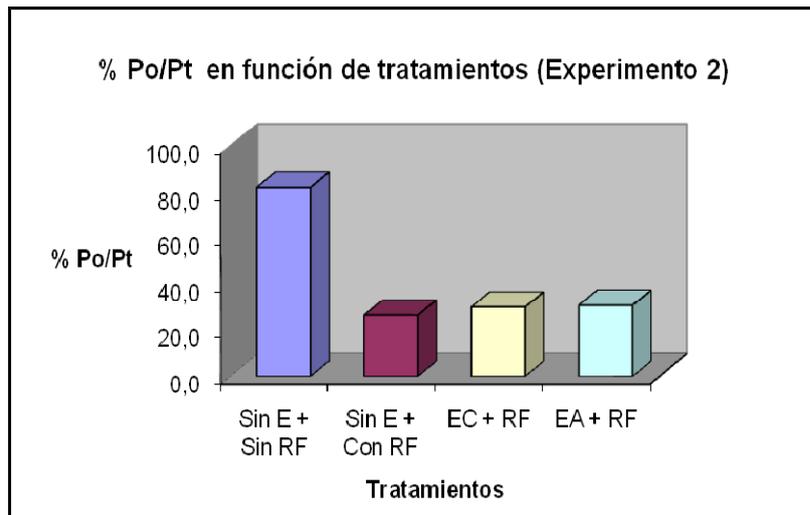
Es de suponer que parte del fósforo disponible provenga de la mineralización del fósforo orgánico, así como también de la disolución de la roca fosfórica como es el caso del experimento 2 (Gráfico 2), donde la adición de 100 ppm P proveniente de la roca, permite un incremento en la fracción Pi del 55.9 % respecto al control sin roca. Estos resultados son favorables con respecto a que cumplen mejor con los requerimientos de la planta, en cuanto al contenido de P disponible se refiere.

Sin embargo, al añadirle la roca a los suelos tratados con emulsiones, el efecto que ocurre es contrario al del experimento 1, ya que ocurre una disminución del Pi y un aumento del Po del 4.4 %; este último podría ser eventualmente mineralizable (Tabla 12).

Tabla 12. Tabla correspondiente al gráfico 2.

Tratamientos	Tipo de emulsión	% Po/Pt
SC ₁₅	Sin E + Sin RF	82,3
SR	Sin E + Con RF	26,5
SREC	EC + RF	30,1
SREA	EA + RF	30,9

Gráfico 2. Gráfico representando los valores de % Po/Pt para el experimento 2.



Es posible que se requieran mayores cantidades de fertilizantes (>100 ppm P) o más tiempo de incubación (> 15 días), de tal modo que el proceso de inmovilización-mineralización continúe y ocurra la transformación del Po (Tabla 10) a Pi disponible.

Se concluye debido a los valores C/Po reportados en la sección anterior, que los tratamientos con emulsión presentan una menor relación C/Po respecto al control SR, lo que se podría traducir en una mayor mineralización del Po.

CONCLUSIONES

- Para el experimento 1, con una incubación de 60 días, no hubo un efecto notable de las emulsiones asfálticas sobre la cantidad y movilidad de P en el suelo. Sólo se observan pequeños cambios en las fracciones de Bi-Pi, HCl-Pi y Pmicrobiano.
- Los valores de las distintas fracciones del P para el experimento 2, aumentan conforme ocurre una disminución del P en resina y el P residual, por lo que, para este caso si ocurre movilidad del P apreciable. Además para este experimento, ocurre un incremento del valor de fósforo orgánico debido a la presencia de las emulsiones, lo cual resulta favorable para el crecimiento de las plantas.
- Se determinó que el tipo de emulsión (catiónica ó aniónica) no presenta efecto alguno sobre las cantidades de P en el suelo.
- La adición de roca fosfórica al suelo, produjo un incremento en casi todas las fracciones de P, resaltando que el mayor porcentaje de aumento corresponde a las formas de P disponible.
- La adición de la roca fosfórica, en conjunto con las emulsiones, es necesaria, ya que ésta es la que permite observar cambios en las diversas fracciones en experimentos a corto plazo.
- Ambos métodos para la estimación de P orgánico (Saunders and Williams y Hedley and col.) son apropiados, ya que no presentaron a nivel estadístico ninguna diferencia significativa, más si una sobreestimación por parte del método de ignición.
- El incremento en las fracciones de P_0 se debe principalmente a las fracciones extraídas con NaOH, lo cual se debe al mayor contenido de fosfatos de Fe y Al en el suelo ultisol estudiado.
- El suelo Ultisol arenoso, presenta bajos contenidos de MO para todos los tratamientos, de esta manera se pueden explicar los bajos contenidos de P y la baja retención de humedad del mismo.

- Las emulsiones asfálticas no generaron efecto alguno sobre el porcentaje de materia orgánica (MO).
- Para ambos experimentos predominan los procesos de mineralización (relación $C/P_o \leq 200$) y entre los tratamientos no existen diferencias significativas. Sin embargo, para el segundo experimento la adición de emulsiones permite un incremento en la velocidad de mineralización de P, posiblemente debido a la actividad microbiana del suelo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a futuro realizar nuevos experimentos con tiempos de incubación más largos, donde se incluyan suelos incubados con RF en conjunto con las emulsiones, para poder verificar la dinámica del P y si la disolución de la roca ha sido completa.

Una dosis de emulsión asfáltica mayor es posible que pueda permitir cambios más apreciables en las fracciones de P.

Otra opción para futuras investigaciones puede ser el incremento de la cantidad de RF en el suelo para hacerlo comparable a la cantidad de la misma que normalmente se añaden a las cosechas en suelos altamente meteorizados (300 ppm de P).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sarmiento, G. (1990), Las sabanas americanas: Aspectos de su biogeografía, ecología y utilización. Fondo Editorial Acta Científica Venezolana, Mérida.
- [2] Lobo, D., I. Pla y A. Florentino (1983), Uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de maní en un ultisol arenoso de la Mesa de Guanipa, *Agronomía Tropical*, 34 (1-3), 43-48.
- [3] Pérez, M. (2002), Alternativas en el manejo agroecológico y sucesión temprana en sabanas de drenaje interno rápido, ubicadas al norte del estado Amazonas. TEG, Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, U.C.V., 13-32.
- [4] López-Hernández, D. y A. Ojeda (1996), Alternativas de manejo agroecológico de los suelos de las sabanas al norte de Suramérica, *Sociedad Venezolana de Ecología*, *Ecotrópicos* 9(2), 101-117.
- [5] Boschetti, G. y C. Quintero (2001). Página:
<http://www.fertilizar.org.ar/articulos/importancia%20del%20fosforo%20organico%20del%20suelo.htm>. Último día de consulta: 28/10/07.
- [6] Adams, M. (1995), Fundamentos de química de suelos, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, U.C.V., Caracas, Venezuela, Cap. II, IV y V.
- [7] Lomelí, M. y R. Tamayo (2003). Página:
<http://www.sagangea.org/hojaredsuelo/paginas/30hoja.html>. Último día de consulta: 28/10/07.
- [8] Bornemisza, E. (1982), Introducción a la química de suelos, Secretaría General de la organización de estados americanos, Programa regional de desarrollo científico y tecnológico, Serie Química, monografía N° 25, Washington, D.C., 1-51.
- [9] Pla, I., A. Florentino y D. Lobo (1981), Regulación del régimen hídrico de suelo bajo agricultura de secano en Venezuela mediante la aplicación superficial de emulsiones de asfalto, *Revista Facultad de Agronomía* (Maracay), 12(1-2), 137-163.

- [10] Casanova, E. (1996), Introducción a la ciencia del suelo, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, U.C.V., Caracas, Venezuela, 61-247.
- [11] Murrell, T. (2003), Transformaciones de los nutrientes en el suelo. *Informaciones Agronómicas*, Instituto de la Potasa y el Fósforo- INPOFOS, 49:1-5.
- [12] López-Hernández, D. (1977), La Química del fósforo en suelos ácidos, Ediciones de la Biblioteca, Colección de Ciencias Biológicas VI, Facultad de Ciencias, U.C.V.
- [13] Stevenson, F. y M. Cole. (1999), *Cycles of Soil*, John Wiley & Sons, Inc. Second Edition, U.S.A., 1-17.
- [14] Soil Science Society of América (1965), Glosario de términos en las ciencias del suelo, *Soil Science Soc. Am. Proc.*, 29(3), 330-351.
- [15] Romera, M. (2004), Fuente: Internet. Página: <http://www.infoagro.com>. Día de última consulta: 30/10/07.
- [16] Montesinos, C. (1994), Fuente: Internet. Página: <http://www.clades.cl/revistas/8/rev89.htm>. Día de la última consulta: 30/10/07.
- [17] Bohn H., B. McNeal y O'Connor (1993), Química del suelo, Editorial Limusa, S.A., Cap. 5 y 6.
- [18] Buckman, H. y N. Brady, (1977), Naturaleza y propiedades de los suelos, Montaner y Simón, S.A. Barcelona, España, 1-167 y 375-557.
- [19] Laidler, K. y J. Meisser, (1982), *Physical Chemistry*, Addison Wesley, Cap. 18, 827.
- [20] Barrow, J. (1987), *Reactions with variable-charge soils*, Dordrecht Martinus Ni Jhoff, 191.
- [21] Dorronsoró, C. (2005), Fuente: Internet. Página: <http://edafología.ugr.es/index.htm>. Día de última consulta: 30/10/07.
- [22] Enwezor, W. O. (1968), Significance of the C: Organic P ratio in the mineralization of soil organic phosphorus, *Soil Science*, N°1, 100, 61-65.
- [23] Fuente: Internet. Página: <http://www.fertilizando.com/articulos/fertilizantes%20organominerales.asp>, último día de consulta: 25/10/07.

- [24] Álvarez, L. (2004), Mineralización in vitro de nitrógeno y fósforo y contenido de metales pesados en suelos acondicionados con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas servidas, Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Agronomía, Universidad de Chile, Chile.
- [25] Chang, S. & M. Jackson (1957), Fractionation of soil phosphorus, *Soil Science*, 84, 133-144.
- [26] Petersen, G. y R. Corey (1966), A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 30, 563-565.
- [27] Williams, J., J. Syres and T. Walker (1967), Fractionation of soil inorganics phosphate by a modification of Chang and Jackson procedure, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 31, 736-739.
- [28] Sharpley, A., U. Singh, G. Uehara, and J. Kimble (1989), Modeling Soil and Plant Phosphorus Dynamics in Calcareous and Highly Weathered Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 153-158.
- [29] Sattell, R., and R. Morris, (1992), Phosphorus Fractions and Availability in Sri Lankan Alfisols, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1510-1515.
- [30] Hedley, M., J. Stewart y B., Chauhan (1982), Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations, *Soil Science Society of America Journal*, 46, 970-976.
- [31] Tiessen, H., B. Steward, and C. Cole (1984), Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 853-858.
- [32] Fernández López, C. (2004), Estado del fósforo en Entisoles con producción citrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, U.N.N.E., Corrientes, Argentina.
- [33] Mórtola, N., A. Lupi, R. Fernández y D. Carreira (2006), Fracciones de fósforo bajo diferentes sistemas de manejo de residuos forestales Instituto de Suelos INTA Castelar, Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Castelar, Argentina.
- [34] Borie, F. & R. Rubio (2003), Total and Organic phosphorus in Chilean volcanic soils, *Gayana Bot.*, 60(1), 69-78.

- [35] Romero, G. (1994), Disolución de la Roca Fosfórica Monte Fresco en diferentes suelos bajo condiciones variables de humedad, Tesis de Postgrado, Facultad de Agronomía, U.C.V., 105-116.
- [36] Saunders, W. y E. Williams (1955), Observations on the determination of total organic phosphorus in soils, *J. Soil Science*, 6, 254-267.
- [37] Mehta, N., J. Legg, C. Goring y C., Black (1954), Determination of organic phosphorus in soils, Extraction methods. *Soil Science Soc. Am. Proc.*, 18, 443-449.
- [38] Bowman, R. (1989), A Sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus, *Soil Science Society of America Journal*, 53, N° 2, 362-366.
- [39] Bowman, R. y C. Cole (1978), An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from Grassland Soil, *Soil Science*, 125(2), 95-101.
- [40] Tiessen, H. (1989), Methods for characterizing soil phosphorus. In *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*, Ed. By J. M. Anderson y J. S. Ingram, C.A.B., Wallingford, United Kingdom, 113-126.
- [41] Agbenin, J., E. Iwuafor y B. Ayuba (1999), A critical assessment of methods for determining organic phosphorus in savanna soils. *Biol Fertil Soils*, 28, 177-181.
- [42] Bowman, R. y C. Cole (1978), Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction, *Soil Science*, 125(1), 49-54.
- [43] Hernández, I. (1996), Dinámica del fósforo en una sabana de *Trachypogon* de los llanos altos centrales, Tesis Doctoral en Ecología, Facultad de Ciencias, U.C.V., 112-128.
- [44] Anderson, G. (1960), Factors affecting the estimation of phosphate esters in soil, *J. Sci. Food Agric.*, 11, 497-503.
- [45] Condon, L.; J., Moir; H., Tiessen y J., Stewart (1990), Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils, *Soil Sci. Soc. Am. I*, 54, 1261-1266.

- [46] Ojeda, A. (1995), Transformación del fósforo orgánico en un suelo ácido de sabana, sometido a distintas alternativas de manejo agroecológico, Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, U.C.V., 168.
- [47] Mc Gill, W y C. Cole (1981), Comparative aspects de C, N, S y P cycling through soil during pedogenesis, *Geoderma*, 26, 267-286.
- [48] López-Contreras, A., I., Hernández-Valencia y D. López- Hernández (2007), Fractionation of soil phosphorus in organic amended farms located on savanna sandy soils of Venezuelan Amazonian, *Biol Fértil Soils*, 43, 771-777)
- [49] Díaz, N. (2005), Transformación de fósforo orgánico en un suelo ácido de sabana tratado con enmiendas orgánicas, TEG, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V.
- [50] Tiessen, H. y J. Moir (1993), Characterization of available P by sequential extraction, In: Carter, M. R. (ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Boca Ratón, 75-86.
- [51] Ojeda, A. y D. López-Hernández (2000), “Dinámica de las fracciones de fósforo disponible en un ultisol de sabana tratado con distintos abonos verdes”, *Ecología Latinoamericana. Actas III. Congreso Latinoamericano de Ecología*, Publicado por la Universidad de Los Andes, Cons. Publ. CDCH, Mérida, 65-71.
- [52] Hernández-Valencia, I. y M. Bautis (2005), Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares, *Bioagro* 17(2), 69-78.
- [53] Sánchez, S. (1999), Efecto de los abonos orgánicos y la emulsión asfáltica sobre la conservación de suelos, agua, nutrientes y el rendimiento del cultivo de cebollín, Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, U.C.V, Maracay, Venezuela.
- [54] Pla, I., D. Lobo y A. Florentino (1983), Uso de emulsiones de asfalto para incrementar y regular la productividad de sorgo en un alfisol franco-arenoso de los llanos ondulados del norte de Estado Guárico – Sector Chaguaramas, *Revista de la Facultad de Agronomía*. U.C.V. Maracay, Venezuela.

- [55] Salem, N., M. Verloo y M. de Boodt (1985), Effects of bituminous emulsions on retention and release of some chemical elements in two soil samples, *Geoderma*, 35, 241-249.
- [56] Fortún, C. y A. Fortún. (2005), Quantification of Soil Aggregates Treated with Bituminous Emulsion and Other Organic Amendments by Using scanning Electron Microscope, *Arid Land Research and Management*, Taylor & Francis 19: 183-195.
- [57] Página Internet: http://www.gobiernoenlinea.ve/venezuela/perfil_anzoategui.html#. Última fecha de consulta: 11/11/07.
- [58] Página Internet: <http://izt.ciens.ucv.ve/junin>. Última fecha de consulta: 13/11/07.
- [59] Página de Internet: www.pdv.com/lexico Última fecha de consulta: 13/11/07.
- [60] Herrera, T. (2007), Efecto de las emulsiones asfálticas sobre la adsorción de fósforo en suelos ácidos, Tesis de Pre-grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V., 58, 69-70.
- [61] Ojeda, A. y D. López-Hernández (1994), Changes of phosphorus contents in light and heavy soil organic matter induced by different tillage systems, 673-678, In N. Senesi & T.M. Miano (de.) *Humic Substances in the Global Environment and Implications in Human Health*, 6 th International Meeting International Humic Substances Society, sep. 20-25, 1992, Instituto di Chimica Agraria, Universita di Bari, Monopoli, italy.
- [62] Olsen, S y L. Sommers (1982), Phosphorus. In: A.L. Page, R.H. Miller y D. R. Keeney (Eds), *Methods of Soil Analysis, Agronomy Am. Soc. of Agron.(9)*, Wisconsin, U.S.A., 401-430.
- [63] Murphy, J. y J. Riley (1962), A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, *Anal. Chem. Acta*, 27, 31-36.
- [64] Olsen, S. R. y L. E. Sommers (1982), *Methods of soil analysis (Part 2 in the series)*, Chemical and microbiological properties, second Edition, Agronomy, Number 9, Wisconsin, USA, 411.
- [65] Laboratorio de Estudios Ambientales (1995), *Guía de Laboratorio de Ciencias del Suelo*, Instituto de Zoología Tropical, Facultad de Ciencias, UCV, Caracas.

- [66] Agüero, L. (2008), Efecto combinado de las emulsiones asfálticas sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo ácido de carga variable, TEG, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V.
- [67] Morales, F. (2008), Efecto combinado de las emulsiones asfálticas catiónica y aniónica sobre la adsorción de fósforo en un suelo ácido de sabana, TEG, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, U.C.V.
- [68] Sharpley, A. N. (1985), Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 905-911.
- [69] Crews, T., K. Kitayama, J. Fownes, R. Riley, D. Herbert y P. Vitousek (1995), Changes in soil phosphorus fractions and ecosystem dynamics across a long chronosequence in Hawaii: *Ecology*, 76 (5), 1407-1424.
- [70] Williams, J., J. Syers y T. Walker (1967), Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 736-739.
- [71] Williams, J., J. Syers, T. Walker y R. Rex (1970), A comparison of methods for the determination of soil organic phosphorus, *Soil Sci.*, 110 (1), 13-18.
- [72] Potter, R., C. Jordan, R. Guedes, G. Bateman y V. Han (1991) Assessment of phosphorus fractionation method for soils: problems for further investigation. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 34, 453-463.
- [73] Sindoni, M., L. Caraballo y T. Rodríguez. (1995) Taller: Aspectos físicos de los suelos de las sabanas orientales y su efecto sobre la productividad. Fondo nacional de investigaciones agropecuarias (FONAIAP), Anzoátegui, Venezuela, 55.
- [74] Smeck, N.E. (1985), Phosphorus dynamics in soils and landscapes, *Geoderma*, 36, 185-199.

Anexos

Anexo 1 y 2. Monolitos iniciales y balanza utilizada para el control de humedad (60 % CC)



Anexo 3. Secado de muestras luego del tiempo de incubación.



Anexo 4. Muestras incubadas con emulsión y RF**Anexo 5 y 6.** Extracto de Bicarbonato y la materia orgánica precipitada por floculación.**Anexo 7.** Curva de Calibración más baja (0.01-0.05 ppm de P)

Anexo 8. Muestras con ignición para determinar Pt por Saunders y Williams modificado.



Anexo 9. Curva de calibración de C



Anexo 10 y 11. Coloraciones de las muestras para medir carbono.

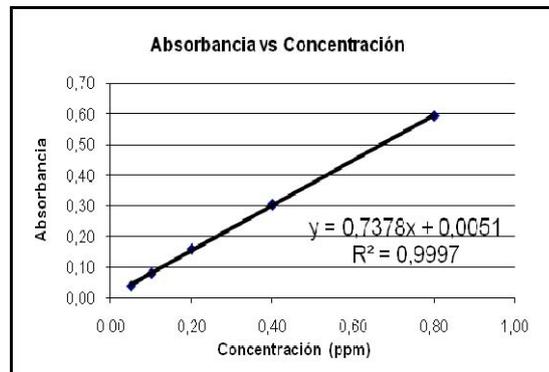


Anexo 12 y 13. Tres réplicas de una muestra y muestras de carbono enrasadas para medir.



Anexo 14. Calibración de las resinas iónicas utilizadas

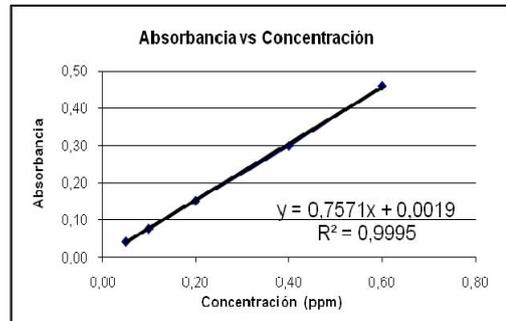
C (ppm)	Abs Prom.
0,05	0,037
0,10	0,078
0,20	0,158
0,40	0,303
0,80	0,593



Replica	Promedio Abs	Factor de diluc. (micro g/mL)	P solución	Porcentaje recuperación (%)	Promedio %
0,10	0.047	0.0568	0.08	84	94
0,20	0.105	0.1350	0.20	99	
0,40	0.197	0.2601	0.38	96	
0,60	0.292	0.3893	0.57	95	
0,80	0.391	0.5235	0.77	96	

Anexo 15. Determinación de P en la RF.

C (ppm)	Abs Prom.
0,05	0,043
0,10	0,077
0,20	0,152
0,40	0,299
0,60	0,460



Replica	Promedio Abs	Prom. Abs-B	Alicuota (mL)	Factor de diluc. (micro g/mL)	Peso suelo	Porcentaje (%)	Promedio %
RF (1)	0,223	0,2060	0,03	112326	1,0003	11,23	11,20
RF (1)	0,230	0,2130	0,03	116178	1,0003	11,61	
RF (2)	0,221	0,2045	0,03	111500	1,0001	11,15	
RF (2)	0,215	0,1980	0,03	107923	1,0001	10,79	
X Blanco	0,017						

Anexo 16: Análisis de varianzas del experimento 1, con un $p < 0,05000$.

Variable	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p
	Efecto	Efecto	Efecto	Error	Error	Error		
P H ₂ O	0,2	3	0,1	6	23	0,3	0,210966	0,887762
P resina	1,5	3	0,5	2	23	0,1	6,131115	0,003206
Bi (Pi)	1,2	3	0,4	3	23	0,1	3,451369	0,033171
Bi (Po)	5,7	3	1,9	34	23	1,5	1,273320	0,306963
P mic.	4,9	3	1,6	9	23	0,4	4,291318	0,015215
NaOH (Pi)	0,1	3	0,0	23	23	1,0	0,047243	0,986035
NaOH (Po)	901,5	3	300,5	2244	23	97,6	3,080318	0,047497
NaOHs (Pi)	3,1	3	1,0	11	23	0,5	2,045601	0,135473
NaOHs (Po)	1,9	3	0,6	34	23	1,5	0,427582	0,735129
P HCl	8,4	3	2,8	17	23	0,7	3,753474	0,024930
P residual	1213,7	3	404,6	3604	23	156,7	2,581939	0,078033
PT	116,6	3	38,9	2056	50	41,1	0,945417	0,425816
CoT	896824,4	3	298941,5	2496809	23	108556,9	2,753776	0,065636
Po	64,1	3	21,4	339	23	14,7	1,449759	0,254286
CoT/Po	122,4	3	40,8	1585	23	68,9	0,592335	0,626311

*Analysis of Variance (Sheet1 in Imported from F:\Mis documentos\Mis archivos recibidos\para estadística.xls) Marked effects are significant at $p < 0,05000$; Include condition: Experimento=1

Anexo 17. Método Duncan para el extracto P resina del experimento 1

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=1,5023	M=1,1440	M=,88931	M=1,0842
Sin tratamiento {1}		0,033019	0,001337	0,018640
Sin emulsión {2}	0,033019		0,139981	0,708632
Emulsión catiónica {3}	0,001337	0,139981		0,229423
Emulsión aniónica {4}	0,018640	0,708632	0,229423	

Anexo 18. Método Duncan para el extracto P_{Bi} del experimento 1

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=,39206	M=,72569	M=,17424	M=,19698
Sin tratamiento {1}		0,086178	0,280237	0,305327
Sin emulsión {2}	0,086178		0,011049	0,012181
Emulsión catiónica {3}	0,280237	0,011049		0,903882
Emulsión aniónica {4}	0,305327	0,012181	0,903882	

Anexo 19. Método Duncan para el extracto P microbiano del experimento 1

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=,48053	M=,63715	M=,2593	M=,3533
Sin tratamiento {1}		0,651337	0,041243	0,029124
Sin emulsión {2}	0,651337		0,019748	0,012822
Emulsión catiónica {3}	0,041243	0,019748		0,785895
Emulsión aniónica {4}	0,029124	0,012822	0,785895	

Anexo 20. Método Duncan para el extracto P_{NaOH} del experimento 1

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=32,635	M=27,740	M=29,889	M=33,506
Sin tratamiento {1}		0,028162	0,050316	0,446540
Sin emulsión {2}	0,028162		0,724380	0,110110
Emulsión catiónica {3}	0,050316	0,724380		0,176488
Emulsión aniónica {4}	0,446540	0,110110	0,176488	

Anexo 21. Método Duncan para el extracto P_{HCl} del experimento 1

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=1,8050	M=2,6755	M=1,5989	M=1,0310
Sin tratamiento {1}		0,081095	0,669636	0,137703
Sin emulsión {2}	0,081095		0,042211	0,003686
Emulsión catiónica {3}	0,669636	0,042211		0,245984
Emulsión aniónica {4}	0,137703	0,003686	0,245984	

Anexo 22. Análisis de varianzas del experimento 2, con un $p < 0,05000$.

Variable	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p
	Efecto	Efecto	Efecto	Error	Error	Error		
P H2O	0,9	2	0,45	42	24	1,7	0,26227	0,771478
P resina	764,3	2	382,15	2553	24	106,4	3,59260	0,043167
Bi (Pi)	300,0	2	150,02	762	24	31,8	4,72280	0,018641
Bi (Po)	282,0	2	140,98	198	24	8,3	17,07656	0,000024
P mic.	12,0	2	5,98	60	24	2,5	2,41225	0,111018
NaOH (Pi)	101,6	2	50,78	306	24	12,8	3,97807	0,032202
NaOH (Po)	106,1	2	53,07	660	24	27,5	1,92875	0,167197
NaOHs (Pi)	2,6	2	1,32	17	24	0,7	1,89096	0,172738
NaOHs (Po)	29,7	2	14,84	40	24	1,7	8,99386	0,001216
P HCl	1046,1	2	523,06	2112	24	88,0	5,94453	0,007998
P residual	803,4	2	401,68	5541	23	240,9	1,66747	0,210741
PT	16342,8	2	8171,41	27623	24	1150,9	7,09972	0,003783
CoT	160580,4	2	80290,22	1688528 1	24	703553,4	0,11412	0,892631
Po	56,5	2	28,26	2035	24	84,8	0,33336	0,719776
CoT/Po	194,1	2	97,03	13729	24	572,0	0,16962	0,844985

*Analysis of Variance (Sheet1 in Imported from F:\Mis documentos\Mis archivos recibidos\para estadística.xls) Marked effects are significant at $p < 0,05000$; Include condition: Experimento=2

Anexo 23. Método Duncan para el extracto P resina del experimento 2

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,0000	M=30,646	M=26,886	M=26,830
Sin tratamiento {1}				
Sin emulsión {2}			0,054730	0,045464
Emulsión catiónica {3}		0,054730		0,991440
Emulsión aniónica {4}		0,045464	0,991440	

Anexo 24. Método Duncan para el extracto P_{Bi} del experimento 2

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,0000	M=16,736	M=15,740	M=15,777
Sin tratamiento {1}				
Sin emulsión {2}			0,023692	0,029181
Emulsión catiónica {3}		0,023692		0,989651
Emulsión aniónica {4}		0,029181	0,989651	

Anexo 25. Método Duncan para el extracto P_{NaOH} del experimento 2

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,0000	M=14,712	M=18,096	M=18,600
Sin tratamiento {1}				
Sin emulsión {2}			0,032039	0,046213
Emulsión catiónica {3}		0,032039		0,779673
Emulsión aniónica {4}		0,046213	0,779673	

Anexo 26. Método Duncan para el extracto P_{NaOHs} del experimento 2

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,0000	M=2,8266	M=5,1570	M=4,7555
Sin tratamiento {1}				
Sin emulsión {2}			0,001609	0,005539
Emulsión catiónica {3}		0,001609		0,530386
Emulsión aniónica {4}		0,005539	0,530386	

Anexo 27. Método Duncan para el extracto P_{HCl} del experimento 2

Tratamiento	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,0000	M=27,453	M=29,730	M=28,190
Sin tratamiento {1}				
Sin emulsión {2}			0,004854	0,037612
Emulsión catiónica {3}		0,004854		0,313468
Emulsión aniónica {4}		0,037612	0,313468	