

ADSORCION, DESORCION Y DISPONIBILIDAD
DE FOSFORO EN SUELOS CALCAREOS

ROGELIO ARMANDO ALDACO NUNCIO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
AREA: SISTEMAS DE PRODUCCION



Universidad Autónoma Agraria
"Antonio Narro"

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

SEPTIEMBRE DE 2002



13753

BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.

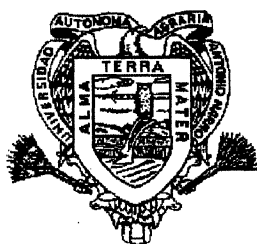
**ADSORCIÓN, DESORCIÓN Y DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO
EN SUELOS CALCÁREOS**

ROGELIO ARMANDO ALDACO NUNCIO

T E S I S

**Presentada como requisito parcial
para obtener el grado de**

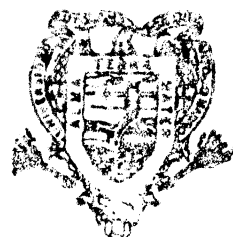
**Doctor en Ciencias Agrícolas
Área: Sistemas de Producción**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

PROGRAMA DE POSGRADUADOS

**Buenavista, Saltillo, Coah.
SEPTIEMBRE DE 2002**



13753

**BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.**

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCION DE POSTGRADO

Adsorción, Desorción y Disponibilidad de Fósforo en Suelos Calcáreos

TESIS

POR

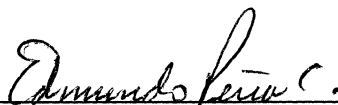
ROGELIO ARMANDO ALDACO NUNCIO

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como requisito parcial para otorgar el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

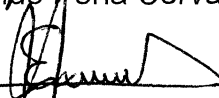
COMITE PARTICULAR

Asesor principal:



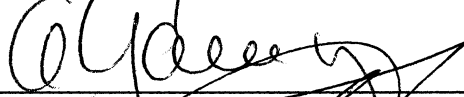
Dr. Edmundo Peña Cervantes

Asesor :



Dr. Eduardo Alberto Narro Farías

Asesor :



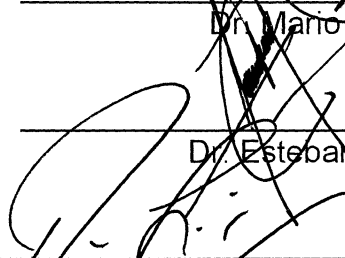
Dr. Arturo Gallegos del Tejo

Asesor :

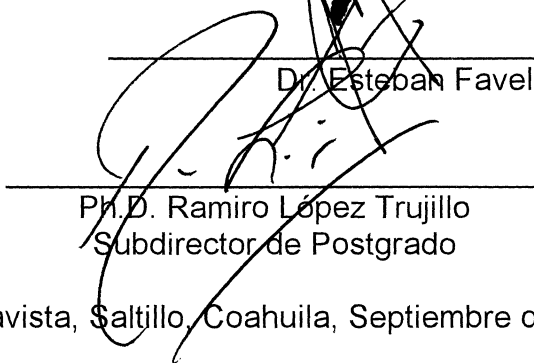


Dr. Mario García Carrillo

Asesor :



Dr. Esteban Favela Chávez



Ph.D. Ramiro López Trujillo
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Septiembre de 2002

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de adquirir un tesoro invaluable en mi formación profesional a través de nuevos conocimientos y experiencias en sus aulas, lo que hace que me sienta profundamente orgulloso de mi querida Alma Mater.
- A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria por su amplio apoyo para la realización de mis estudios de doctorado y especialmente al M.C. Juan Jaime Guerrero Martínez en su momento Jefe del Departamento de Investigación y Posgrado por su gran amistad, así como por su decisivo e incondicional apoyo para la realización de esta investigación.
- Al Consejo Nacional del Sistema de Educación Tecnológica (COSNET) por el invaluable apoyo económico que se me otorgó a lo largo de mis estudios de doctorado.
- A los miembros de mi Comité Particular de Asesoría integrado por el Dr. Edmundo Peña Cervantes, Dr. Eduardo Alberto Narro Farias, Dr. Arturo Gallegos Del Tejo, Dr. Mario García Carrillo y Dr. Esteban Favela Chávez, por su apreciable amistad, valiosos consejos, asesoría en la planeación, conducción y evaluación del trabajo de investigación en el laboratorio, invernadero y campo, así como en la minuciosa revisión del presente escrito. A todos y cada uno de mis asesores y en particular al Dr. Peña, les reitero mis respetos por su gran sentido del deber y el alto profesionalismo mostrado a través de mis estudios.
- Al Personal del Departamento de Suelos de la Universidad, integrado por el Jefe del Departamento, Maestros, Laboratoristas, Secretarias, Almacenistas e Intendencia a todos les doy las gracias por brindarme la oportunidad de convivir con Ustedes, así como por su gran disposición al momento de solicitar su apoyo a lo largo de tres años y medio de mi estancia en la Universidad.
- Al M.C. Juan Manuel Covarrubias del INIFAP de Arteaga Coah. por su amistad y gran apoyo en la planeación, conducción y evaluación de esta investigación.
- A Don David Cabello, productor de papa y dueño del Rancho “El Bayonero” por tener la confianza en la realización de este proyecto. Gracias por su entusiasta e incondicional apoyo para la realización de la investigación en campo.
- A el Ing. Eduardo Villarreal Dávila, productor de papa, por brindarme la oportunidad de trabajar con los suelos de los ranchos “El Venado”, “El Potrero” y “El Erial”. Gracias por su gran interés en la realización de esta investigación.

DEDICATORIAS

- A Dios Por darme la vida y estar siempre a mi lado. Gracias SEÑOR por tu incomparable paz y amor, solamente al abrigo de tu bendita mano es posible encontrar el amor perfecto que en tu infinita misericordia nos haz dado y el que cualquier ser humano puede tener simplemente al acercarse a Ti.
- A mis Padres: Sr. Anacleto Aldaco Malacara y Sra. Olivia Nuncio de Aldaco por ser fruto de su Amor y ser en mi vida ejemplo de optimismo y deseos de superación en los momentos mas dificiles.
- A mi Esposa: Sra. Hilda Idalia de Alba de Aldaco por ser el mejor regalo que DIOS me dio en Ti. Gracias por tu generoso e incondicional apoyo, siempre lo recordare.
- A mis Hijos: Rogelio Armando, Uziel Abimael y Jessica Magali Aldaco de Alba por su cariño y paciencia hacia mi. Gracias Hijitos por su amor incondicional, siempre estaré al pendiente de Ustedes y nunca les fallaré.
- A mis Hermanos: Guadalupe, Gustavo, Maria Elena, Marco Antonio, Angélica, José Alberto, Luis Gerardo, Pablo Enrique y Gloria Olivia porque en mayor o en menor medida siempre he contado con su apreciable apoyo y me siento muy orgulloso de ser su hermano. Gracias, que DIOS les cuide y les colme de Bendiciones a Ustedes y sus Familias.
- A mis Familiares: Raúl Valdés Nuncio y especialmente a la Sra. Antonia Nuncio del Bosque (+) de quien siempre recibí su inapreciable cariño y un apoyo total e incondicional en mi formación profesional.
Amparo del Bosque López, Martha del Bosque, José de León (+), Armando, Adriana y Laura de León del Bosque, a todos muchas gracias por su apoyo y palabras de aliento.
- A mis Compañeros: Por su amistad y su gran espíritu de compañerismo mostrado especialmente a Blanca Valdivia, Bonifacio Martínez Anguiano, Homero Castellanos, Jaime García Hernández, Elena Estrella, Noe Armando Ávila, Pedro Haro Ramírez, Mariano Mendoza, Francisco Nieto, Rubén López Cervantes, Alejandro Hernández , Juan Munguia y José Alfredo Montemayor Trejo.

COMPENDIO

Adsorción, desorción y disponibilidad de fósforo en suelos calcáreos

POR

ROGELIO ARMANDO ALDACO NUNCIO

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

ÁREA: SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPTIEMBRE 2002

Dr. Edmundo Peña Cervantes - Asesor -

Palabras claves: Adsorción, desorción, isotermas, fósforo, papa,
suelos calcáreos.

Al norte de México en los suelos del sureste de Coahuila y una parte de Nuevo León, existe un problema relacionado con la fertilización fosfatada, ya que los productores del cultivo de papa al utilizar métodos tradicionales de fertilización aplican grandes cantidades de fósforo con eficiencias entre el quince y el dieciocho por ciento, lo que propicia un alto costo en la producción del cultivo.

Se desarrollo una investigación, durante los años 1997 y 1998 que incluyó actividades de laboratorio, invernadero y campo. El objetivo de esta

investigación es ampliar el conocimiento de la dinámica química del fósforo en cuatro suelos calcáreos de los ranchos el Bayonero y el Venado del estado de Coahuila y el Potrero y el Erial del estado de Nuevo León.

En el laboratorio se encontró que las relaciones de adsorción de fósforo son descritas por las Isotermas de Adsorción de Langmuir y de Temkin, en los cuatro suelos. La isoterma de adsorción de Langmuir establece que la capacidad máxima de retención de fósforo sigue el orden: Potrero > Bayonero > Venado > Erial, con valores de 294.12, 256.41, 147.06 y 31.45 mg kg⁻¹. Las relaciones de desorción de fósforo son descritas por los modelos logarítmicos. La cantidad de fósforo liberado de los suelos varía acorde al método de extracción empleado en el laboratorio. En la investigación del invernadero se establece que los cuatro suelos presentan diferente capacidad de adsorción y desorción de fósforo. La producción de biomasa en el cultivo de papa es diferente en estos suelos cuando diferentes dosis de fósforo son aplicadas. El suelo del Bayonero tiene la mejor capacidad de fijación y desorción de fósforo. Los más altos rendimientos de tubérculo se encuentran con los tratamientos de 150 mg kg⁻¹ de P en el suelo del Bayonero, 75 mg kg⁻¹ de P en los suelos del Erial y el Venado y 25 mg kg⁻¹ de P en el suelo del Potrero. En la investigación de campo en el rancho el Bayonero, el rendimiento total de papa y los rendimientos de papa de primera, segunda, tercera y cuarta, no reflejan diferencias estadísticas significativas. Sin embargo, el tratamiento con 50 mg kg⁻¹ de P produce el mejor rendimiento de papa total.

ABSTRACT

Phosphorus adsorption, desorption and availability in calcareous soils

BY

ROGELIO ARMANDO ALDACO NUNCIO

DOCTOR IN AGRICULTURAL SCIENCE

AREA: PRODUCTION SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MEXICO. SEPTEMBER 2002

Dr. Edmundo Peña Cervantes - Advisor –

Key words: adsorption, desorption, isotherms, phosphorus, potato,
calcareous soils.

Phosphorus fertilization represents a problem in northern Mexico since potato producers from southeast of Coahuila and part of Nuevo Leon apply large amounts of fertilizer. This traditional practice results in low fertilization efficiency (15-18 per cents, %) and high production costs.

During 1997 and 1998 a research including laboratory , greenhouse and field experiments was carried out with the objective to study the chemical

dynamic of phosphorus in four calcareous soils from the Bayonero and Venado farms of Coahuila state and the Potrero and Erial farms of Nuevo Leon state.

The results from the laboratory experiment show for the four soils, that phosphorus adsorption is described by the Langmuir and Temkin isotherms. The Langmuir isotherm established that maximum phosphorus retention follows the order: Potrero > Bayonero > Venado > Erial with values of 294.12, 256.41, 147.06 and 31.45 mg kg⁻¹, respectively. Phosphorus desorption relationships are described by logarithmic models. The amount of phosphorus released from the soil varies accordingly to the extraction method used in the laboratory. The results from the greenhouse study show different adsorption and desorption capacity for the four soils studied. Biomass production for potato crop is also different in these soils when different amount of phosphorus is applied. The Bayonero soil has the best phosphorus adsorption and desorption capacity. The highest production of tubercles for the four soils is achieved with a dose of phosphorus per kilogram of soil of 150 mg for the Bayonero soil, 75 mg for the Erial and Venado and 25 mg for the Potrero soil. The field experiment developed at the Bayonero site, show that potato yield and production of first, second, third and fourth grade potato are not statistically different, however the highest yield is obtained with a dose of 50 mg of phosphorus per gram of soil.

INDICE DE CONTENIDO

	Pagina
COMPENDIO	v
ABSTRACT	vii
INDICE DE CONTENIDO	ix
INDICE DE FIGURAS	xii
INDICE DE CUADROS	xv
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos e Hipótesis.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Suelos Calcáreos.....	5
El Fósforo.....	9
Origen del Fósforo en el Suelo.....	10
El Fósforo en el Suelo.....	10
Mineralización de Fosfatos Orgánicos.....	21
Adsorción de Fósforo.....	24
Precipitación de Fosfatos.....	32
Retención del Fósforo por los Constituyentes del Suelo.....	35
La Retención por los Oxidos Hídricos de Hierro y Aluminio.....	36
Retención por los Minerales Alumino-Silicatos.....	45
Retención por Carbonates del Suelo.....	48
Materia Orgánica del Suelo y Retención del Fósforo.....	52
Factores Intensidad y Cantidad.....	59
Caracterización de las Reacciones de Adsorción.....	64
Isoterma de Freundlich.....	65
Isoterma de Langmuir.....	66
Isoterma de Temkin.....	69
Isoterma de Breunauer, Emmett y Teller. (BET).....	72
Aplicaciones de las Isotermas de Adsorción.....	74
Cuantificación de la Desorción de Fósforo.....	82
MATERIALES Y MÉTODOS	90
Pruebas de Laboratorio.....	90
Selección de los Sitios de Estudio.....	90
Descripción de los Sitios Experimentales.....	91
Rancho el Bayonero, Arteaga, Coahuila.....	91

Rancho el Venado, Parras de la Fuente, Coahuila.....	92
Rancho el Potrero, Navidad, Nuevo León.....	92
Rancho el Erial, Galeana, Nuevo León.....	93
La Vegetación en los Sitios de Estudio.....	94
Análisis Físicos y Químicos del Suelo.....	95
Preparación de las Muestras de Suelo.....	95
Metodología para la Cuantificación de Fósforo.....	97
Medición de Fósforo Hidrosoluble.	
Método de Vander Paauw.....	97
Medición de Fósforo Extractable.	
Método de Fox y Kamprath.....	97
Experimento de Invernadero.....	97
Preparación de Macetas.....	97
Tratamiento de los Tubérculos.....	98
Siembra.....	98
Labores de Cultivo.....	101
Riegos.....	101
Control de Malezas.....	101
Plagas y Enfermedades.....	101
Variables Evaluadas.....	102
Altura de Planta.....	102
Número de Tallos por Planta.....	102
Número de Pecíolos Promedio por Planta.....	102
Peso Seco de Planta.....	103
Número de Tubérculos.....	103
Peso Promedio de Tubérculos.....	103
Peso Total de Tubérculos.....	103
Diámetro Polar y Ecuatorial.....	104
Diseño Experimental.....	104
Modelo Estadístico.....	104
Experimento de Campo.....	105
Preparación del Suelo para el Experimento.....	105
Fertilización del suelo.....	105
Siembra.....	106
Acomodo de la Cintilla.....	107
Descripción de los Tratamientos.....	107
Diseño Experimental.....	109
Aplicación de los Tratamientos.....	109
Características de las Unidades Experimentales.....	111
Riegos.....	112
Manejo del Cultivo.....	112
Control de Enfermedades.....	113
Rendimiento de Tubérculos.....	114
Método de Análisis de Datos.....	115
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	116
Pruebas de Laboratorio.....	116
Isotermas de Adsorción.....	116

Isoterma de Langmuir	
Método del Fósforo Hidrosoluble.....	116
Isoterma de Temkin.	
Método del Fósforo Hidrosoluble.....	121
Isoterma de Langmuir.	
Método del Fósforo en Solución de CaCl ₂	125
Isoterma de Temkin.	
Método del Fósforo en Solución de CaCl ₂	125
Curvas de Desorción.....	129
Curvas de Desorción.	
Método del Fósforo Hidrosoluble.....	129
Curvas de Desorción.	
Método del Fósforo en Solución de CaCl ₂	132
Experimento de Invernadero.....	135
Altura de Planta.....	136
Número de Tallos por Planta.....	139
Número de Pecíolos Promedio por Planta.....	141
Peso Seco de la Planta.....	144
Número de Tubérculos.....	146
Peso Promedio de Tubérculos.....	149
Peso Total de Tubérculos.....	151
Diámetro Ecuatorial de Tubérculo.....	154
Diámetro Polar de Tubérculo.....	157
Experimento de Campo.....	159
Análisis del Suelo en Estudio.....	159
Rendimiento de Tubérculo.....	159
CONCLUSIONES.....	175
RESUMEN.....	178
LITERATURA CITADA.....	181
APÉNDICE.....	187

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pagina
2.1 Ciclo del fósforo en el suelo. Fracciones de fósforo en el suelo.	11
2.2 Estatus del fósforo en el suelo, que muestra las tres fracciones del fósforo en el suelo.....	13
2.3 Proporción entre $H_2PO_4^{-1}$ y HPO_4^{-2} en relación al pH del suelo.	15
4.1 Isotermas de adsorción de Langmuir. Suelos de los ranchos Bayonero, Venado, Potrero y Erial. Método del fósforo hidrosoluble.....	117
4.2 Isotermas de adsorción de Temkin. Suelos de los ranchos Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo hidrosoluble.....	121
4.3 Estimación de los niveles de fósforo en solución en $mg \cdot L^{-1}$, en función de la cantidad de fósforo que esta adsorbido a las partículas de los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo hidrosoluble.....	124
4.4 Isotermas de adsorción de Temkin. Suelos de los ranchos Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo en solución de $CaCl_2$	126
4.5 Estimación de los niveles de fósforo en solución en $mg \cdot L^{-1}$, en función de la cantidad de fósforo que esta adsorbido a las partículas de los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo en solución de $CaCl_2$	128
4.6 Curvas de desorción de fósforo en los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Fósforo liberado en función de los niveles de fósforo aplicados al inicio del experimento $mg \cdot kg^{-1}$. Método de fósforo hidrosoluble de Vander Paauw	130

4.7	Curvas de desorción de fósforo en los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Fósforo liberado en función de los niveles de fósforo aplicados al inicio del experimento. $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Método del fósforo en solución de CaCl_2 0.01 M.....	133
4.8	Respuesta de la altura de planta (cm) a los niveles de fósforo aplicados al suelo en cuatro localidades.....	137
4.9	Número de tallos por planta de los cuatro sitios estudiados.....	139
4.10	Número de pecíolos promedio por planta de los cuatro sitios estudiados.....	142
4.11	Peso seco de planta (g) de los cuatro sitios estudiados.....	144
4.12	Número de tubérculos por planta en cuatro sitios de estudio.....	147
4.13	Peso promedio de tubérculos (g) de los cuatro sitios estudiados.....	149
4.14	Peso total de tubérculos (g) de los cuatro sitios estudiados.....	151
4.15	Diámetro ecuatorial de tubérculo (cm). Cuatro sitios estudiados	155
4.16	Diámetro polar de tubérculo (cm). Cuatro sitios estudiados.....	157
4.17	Rendimiento total de tubérculo y su distribución en rendimientos de papa de primera, segunda, tercera y cuarta. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.....	161
4.18	Rendimiento de tubérculo de primera, segunda, tercera y cuarta en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.....	162
4.19	Porcentaje de tubérculo de primera, segunda, tercera y cuarta con respecto al rendimiento total y en función de los niveles de fósforo aplicados. (%). Rancho el Bayonero.....	164
4.20	Rendimiento de tubérculo total en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.	167
4.21	Rendimiento de tubérculo de primera en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.....	168
4.22	Rendimiento de tubérculo de segunda en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.....	169

4.23	Distribución de los rendimientos de tubérculo de primera y segunda con respecto al rendimiento total en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. ton•ha ⁻¹ . Rancho el Bayonero.....	170
4.24	Porcentaje de los rendimientos de tubérculo de primera y segunda y la suma de ambas fracciones porcentuales en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. Rancho el Bayonero.....	170
4.25	Rendimiento de tubérculo de tercera en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. ton•ha ⁻¹ . Rancho el Bayonero.....	172
4.26	Rendimiento de tubérculo de cuarta en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. ton•ha ⁻¹ . Rancho el Bayonero.....	173
4.27	Distribución de los rendimientos de tubérculo de tercera y cuarta con respecto al rendimiento total en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. ton•ha ⁻¹ . Rancho el Bayonero.....	173
4.28	Porcentaje de los rendimientos de tubérculo de tercera y cuarta y la suma de ambas fracciones porcentuales en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. Rancho el Bayonero.....	174

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Pagina
2.1	Ejemplos sobre mineralización de fosfatos orgánicos en diferentes condiciones. (Según Bornemiza).....	23
3.1	Ubicación geográfica de los sitios en estudio y su altitud en m.s.n.m.....	90
3.2	Métodos empleados en los análisis de los suelos en estudio.....	96
3.3	Agroquímicos empleados en el tratamiento de los tubérculos con sus respectivas dosis.....	98
3.4	Tratamientos en estudio y sus concentraciones de fósforo.....	99
3.5	Nutrientes utilizados en el experimento.....	100
3.6	Solución Hogland's utilizada en el experimento de invernadero.	100
3.7	Productos químicos aplicados, dosis y acción que ejercen en la protección de los tubérculos.....	106
3.8	Tratamientos en estudio y sus equivalencias en kg P ha ⁻¹ y kg de P ₂ O ₅ por hectárea.....	108
3.9	Descripción de los tratamientos expresados en diferentes unidades. Rancho "El Bayonero". Ciclo primavera – verano 1998.....	108
3.10	Tratamientos en estudio, expresados en diferentes unidades en función del peso del suelo de la unidad experimental.....	110
3.11	Características de las unidades experimentales.....	111
3.12	Calendario de riegos aplicados al cultivo de papa, Rancho el Bayonero, ciclo primavera – verano 1998.....	112

3.13	Agroquímicos empleados en la fertilización foliar y el control químico de la maleza, durante el desarrollo del cultivo de papa. Rancho "El Bayonero". Ciclo primavera - verano de 1998.....	113
3.14	Dimensiones de los tubérculos de acuerdo a la clasificación y a los estándares nacionales. (cm).....	115
4.1	Capacidad máxima de adsorción de fósforo (b) y constante de energía de retención (k) de los suelos en estudio, valores calculados a partir de la ecuación de Langmuir.....	117
4.2	Capacidad máxima de retención (b), la constante de energía de retención (k) y algunas propiedades de los suelos en estudio.....	119
4.3	Pendiente de las isothermas de adsorción de Temkin, valores de fósforo en solución (mg de P·L ⁻¹) y logaritmo de P en solución en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg de P· kg ⁻¹), en cuatro localidades de estudio.....	123
4.4	Pendiente de las isothermas de adsorción de Temkin, valores de fósforo en solución (mg de P·L ⁻¹) y logaritmo de P en solución en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg de P kg ⁻¹), en cuatro localidades de estudio.....	127
4.5	Valores de fósforo en solución (mg L ⁻¹) en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg kg ⁻¹) y la pendiente de las isothermas, en cuatro localidades.....	129
4.6	Fósforo liberado en función de cuatro cantidades aplicadas de fósforo al inicio del experimento, (mg P·kg ⁻¹ suelo). Método de fósforo hidrosoluble.....	131
4.7	Isotherma de adsorción de Langmuir. Capacidad máxima de retención de fósforo (b), la energía de adsorción de fósforo (k) y contenido de arcilla (%).	132
4.8	Fósforo liberado en función de cuatro cantidades aplicadas de fósforo al inicio del experimento, (mg P·kg ⁻¹ suelo). Método de CaCl ₂ 0.01 M.....	135
4.9	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de altura de planta en las cuatro localidades estudiadas.....	137

4.10	Número de tratamientos y las medias de altura de planta en orden descendente, en centímetros.	138
4.11	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de número de tallos por planta. Cuatro localidades.....	140
4.12	Número de tratamientos y concentración de los valores de número de tallos por planta en orden descendente.....	141
4.13	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de número de pecíolos promedio por planta en cuatro localidades.....	142
4.14	Número de tratamientos y concentración de los valores de número de pecíolos promedio por planta en orden descendente.....	143
4.15	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de peso seco de planta en cuatro localidades.....	145
4.16	Número de tratamientos y concentración de los valores de peso seco de planta en orden descendente, gramos.....	146
4.17	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de número de tubérculos en cuatro localidades.....	147
4.18	Número de tratamientos y concentración de los valores de número de tubérculos en orden descendente.....	148
4.19	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de peso promedio de tubérculos por planta en cuatro localidades.....	150
4.20	Número de tratamientos y concentración de los valores de peso promedio de tubérculos por planta en orden descendente, gramos por unidad experimental.....	150
4.21	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de peso total de tubérculos por planta en cuatro localidades.....	153
4.22	Número de tratamientos y concentración de los valores de peso total de tubérculos en orden descendente, gramos.	154

4.23	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de diámetro ecuatorial de tubérculo en cuatro localidades.....	156
4.24	Número de tratamientos y concentración de los valores de diámetro ecuatorial de tubérculo en orden descendente, cm....	156
4.25	Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de diámetro polar de tubérculo. Cuatro localidades.....	158
4.26	Número de tratamientos y concentración de los valores de diámetro polar de tubérculo en orden descendente, cm.....	158
4.27	Análisis físico-químico del suelo del rancho el Bayonero, en el estrato 0-40 cm de profundidad.....	160
4.28	Concentración de las medias de los rendimientos de tubérculo de primera, segunda, tercera, cuarta y total. ton ha ⁻¹	161
4.29	Concentración de cuadrados medios y coeficientes de variación encontrados en los análisis estadísticos.....	163
4.30	Rendimiento total de tubérculo y la fracción porcentual de papa de primera, segunda, tercera y cuarta.....	165
4.31	Rendimiento total de tubérculo en ton ha ⁻¹ , fracción porcentual de papa de primera, segunda, tercera y cuarta en orden descendente y el número de tratamiento. Rancho el Bayonero.....	166
4.32	Rendimiento total de tubérculo en ton ha ⁻¹ , suma de los rendimientos de papa de primera y segunda y suma de los rendimientos de papa de tercera y cuarta. Fracciones porcentuales de ambas sumas. Rancho el Bayonero.....	171

INTRODUCCIÓN

En el norte de México existen amplias superficies de zonas áridas y semiáridas, las cuales por la acción de su clima y el tipo de material parental han originado la formación de suelos calcáreos, los que se caracterizan por tener gran cantidad de calcio, magnesio, carbonatos, bicarbonatos, pH alcalino, escaso contenido de materia orgánica y alta capacidad de retención de fósforo. Dentro del área de influencia de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, existe una extensa región que comprende la parte sur y sureste del estado de Coahuila hasta el centro-sur-oriental del estado de Nuevo León, la cual se considera una zona de importancia económica en el norte del país por su desarrollo agrícola, que es una región frutícola y productora de papa. En esta región existen problemas de nutrición vegetal asociados con los suelos, entre los que se encuentra la fertilización fosfatada, ya que muchos productores aplican grandes cantidades de este fertilizante, no considerando principios y conocimientos químicos del suelo en la mayoría de los casos y la práctica de fertilización la hacen a partir de su experiencia. En el mejor de los casos la eficiencia en el uso de este elemento se ubica entre el 15 y 18 %, lo que repercute en un alto costo de producción. Por estas razones es importante estudiar los factores y las características de los mecanismos de la adsorción y la desorción del fósforo para ampliar el conocimiento sobre su disponibilidad

para las plantas, en los suelos de esta región agrícola.

Los factores Intensidad, Cantidad, Capacidad y Movilidad caracterizan la habilidad de un suelo para proveer a las plantas con nutrimentos en la forma, cantidad y tiempo en que son requeridos; la cantidad de un elemento que esta adsorbido a los coloides del suelo o desorbido de éstos es el factor Cantidad y la concentración del elemento en la solución del suelo es el factor Intensidad.

A mediados del siglo anterior se introdujo el concepto de la relación Cantidad/Intensidad (Q/I) en el estudio del fósforo del suelo, la cual describe la capacidad del suelo para fijar o liberar el fósforo de los coloides del suelo; se confrontan las cantidades de fósforo adsorbido o desorbido contra las concentraciones de fósforo en solución.

En función de la especie de fósforo, se consideran dos clases de relaciones, la Adsorción y la Desorción. Las relación de adsorción de fósforo de los suelos se ha utilizado para determinar el requerimiento del fósforo para producir cultivos, así como para hacer inferencias de la habilidad del suelo para suplementar fósforo, mientras que las relaciones de desorción de fósforo se aplican para fines de nutrición vegetal y para evaluar su dinámica en suelos.

Las curvas de desorción se describen mediante Funciones Logarítmicas, ya que proporcionan mejores resultados cuando el P se aplica en la nutrición vegetal. Aquí, la relación entre el fósforo desorbido del suelo y la

concentración del fósforo en solución son necesarias. Por otro lado la velocidad de reacción del fósforo con el suelo afecta el destino del fósforo añadido, su liberación en la rizosfera y el equilibrio entre el fósforo en las fases sólidas y en el agua percolada, de acuerdo a esto es importante destacar que la cantidad de fósforo disponible para las plantas no depende sólo del tamaño de la fracción del fósforo lábil del suelo, sino que es más importante el trabajo requerido para remover el fósforo desde esta fracción hasta los puntos de absorción radicular. Partiendo de los anteriores conceptos la presente investigación contemplo los siguientes objetivos:

Objetivos e Hipótesis

Objetivo General

Conocer en detalle la dinámica química del fósforo en los suelos calcáreos del área de estudio.

Objetivos Específicos

Evaluar y comparar el uso de modelos matemáticos para describir las relaciones de adsorción y desorción de fósforo de diferentes suelos.

Relacionar la información derivada de las curvas de desorción al crecimiento de la planta y a la absorción de Fósforo.

Validar en campo la información generada de los estudios de laboratorio e invernadero.

Hipótesis

Existen modelos matemáticos que describen los resultados de las pruebas de adsorción y desorción de fósforo en los suelos calcáreos.

Los rendimientos del cultivo de papa se relacionan con las curvas de desorción de fósforo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Suelos Calcáreos

Existen cuatro tipos distintos de suelos alcalinos, de acuerdo a lo mencionado por Cepeda (1983), los cuales son calcáreos(calizos), salinos, sódicos y salino-sódico. El mismo autor establece que los suelos calcáreos suelen presentarse en regiones húmedas, muchos de éstos son suelos jóvenes y se forman en zonas deprimidas sobre materiales de origen ricos en calcio con capa freática superficial.

Estos suelos calcáreos pertenecen en su mayoría al Orden Mollisol de la clasificación americana, los cuales presentan una serie de problemas que derivan de su humedad excesiva en aquellos lugares de alta precipitación, drenaje deficiente, dificultades de aireación, lo que trae como consecuencia que existan dificultades nutritivas que suelen presentar las plantas que se cultivan en estos suelos.

El sistema $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ controla el valor del pH en estos suelos, debido a que la presión parcial del CO_2 es controlada por los factores que favorecen el intercambio gaseoso (aireación) del suelo, este gas disminuye en

el suelo a medida que el espacio poroso es ocupado por el agua de riego y se vuelve a incrementar la concentración de este gas hasta que el suelo éste nuevamente bien aireado. Un alto contenido de agua en el suelo puede disminuir la presión parcial del CO_2 y hace subir el potencial de hidrógeno, es decir que mientras más tiempo permanezca un suelo saturado de agua, esta condición permite la permanencia de pH alcalinos altos. De acuerdo a esto, para suelos calcáreos con el mismo contenido de CaCO_3 es más bajo la cantidad de CO_2 en aquél que tenga más arcilla y más pobre estructura, en virtud del reducido espacio poroso característico de los suelos pesados.

El potencial de hidrógeno (pH) en estos suelos, por lo general oscila entre 7.5 y 8,5 debido a la acción tampón del carbonato de calcio (CaCO_3). A la alcalinidad se le atribuye acción corrosiva de las raíces de las plantas, ya que ocasiona altas concentraciones de iones hidroxilo $(\text{OH})^{-1}$, cuyos efectos dañinos ocurren a un pH de 10.5 en adelante, a la par la limitada disponibilidad de algunos nutrientes, tales como fósforo, zinc, fierro, manganeso y boro, por encontrarse en formas insolubles que no pueden, a la vez, ser absorbidas por las raíces (Russell, 1961; Black 1968 y Foth, 1978).

La alcalinidad desarrolla un aumento en la concentración osmótica que puede llegar a ser más alta en la solución del suelo que en las células de las plantas, lo que propicia que la absorción de nutrimentos esenciales se vea prácticamente nulificada bajo estas condiciones, además de que ocasiona problemas físicos como la dispersión de coloides del suelo, bloqueando poros,

formando costras e impidiendo la libre exploración de las raíces. (Thompson y Frederick, 1978).

Sofyan y Vanderdeelen (1995), indican que se trabajó en 5 suelos calcáreos y 5 suelos ácidos de Bélgica. Se evaluó la dinámica del pH del suelo sobre el tiempo y aquellos factores los cuales influyen cambios en el pH. Los suelos se incubaron, desde 1977, con y sin P aplicado en condiciones naturales y se tomaron muestras de suelo en intervalos regulares. Además se determinaron, los cambios en el C soluble orgánico e inorgánico de los suelos calcáreos. Los resultados demuestran que el pH de los suelos calcáreos se incrementa constantemente como una función del tiempo, cantidades de 0.7 unidades después de 16 años. El pH de los suelos ácidos no estuvo sujeto a los cambios significativos después de la incubación. El carbono soluble orgánico e inorgánico de los suelos calcáreos decrece después de la incubación. Se concluyó que el aumento del pH en los suelos calcáreos se debió, en primer término a un decremento en la presión parcial del CO₂ ocasionada por el decremento del contenido del Carbono soluble orgánico e inorgánico y a una reducción de la actividad microbológica en el suelo.

Cuesta *et al.*, 1987, señalan que un experimento de invernadero con tomates, dos tasas de adición de fósforo, R1 y R2, fueron comparados para un suelo calcáreo, R2 aportó una muy alta concentración de fósforo disponible desde la floración hasta el final del ensayo. Este incremento en fósforo, sin embargo, tiene poco efecto en la absorción de P por los tomates, causado por

problemas de aireación en el sustrato. Confirmándose lo señalado por Thompson y Frederick, (1978) en el sentido de que ve disminuido el espacio poroso del suelo.

Vanderdeelen, (1995), reportan que al trabajar en un suelo calcáreo no cultivado de Bélgica, en campo se hizo un registro del fosfato residual como una función del tiempo. Al inicio del experimento, se aplicó el superfosfato a razón de 150 kg de P•ha⁻¹. Se usó como extractante el NaHCO₃ 0.5 M, el fosfato extractable disminuyó en el tratamiento control, pero en el suelo fertilizado en una tasa diferente como una función de tiempo de agregación, durante más de siete años. La intersección de la regresión lineal expresó la influencia del tiempo de agregación en el fosfato extractable ocurrido en 11.37 y 6.48 años. El P total en la capa arable permaneció constante durante todo el experimento.

Shaviv y Schnek (1989), mencionan que estudiaron la dinámica de disolución de los fertilizantes granulados de P, su transporte y transformación en suelos calcáreos y verificaron los efectos de las adiciones de fosfato de amonio al superfosfato granulado sobre estas reacciones, para registrar los cambios con tiempo de fósforo total, el P intercambiable del agua y el P extractable por bicarbonato en ambos fertilizantes granulados y en el suelo alrededor de los granulados. La disolución del fertilizante induce movimiento del agua al interior de los gránulos, la cual fue seguida por el flujo de la solución de fertilizantes dentro del material circundante del suelo, creando una zona distinta de humedad la cual se incrementa con la proporción de sulfato de

amonio en gránulos. La proporción incrementada de sulfato de amonio aceleró la relación de resolución de la mezcla de fertilizantes y fortaleció el P extractable por el bicarbonato así como el P extractable del agua y el Ca en el suelo alrededor de los gránulos. Esto indujo una relación de fijación rápida de P en los materiales del suelo que reaccionaron con los gránulos de muy alto contenido de sulfato de amonio. Así la recuperación del P extractable por el agua y el bicarbonato de los gránulos y los materiales del suelo disminuyó con los incrementos del contenido de sulfato de amonio en los fertilizantes granulados.

El Fósforo

Bidwell (1979) establece que el fósforo como el nitrógeno, es muy importante como parte estructural de muchos compuestos. Principalmente ácidos nucleicos y fosfolípidos. Además desempeña una función indispensable en el metabolismo energético; la elevada energía de la hidrólisis del pirofosfato y diversos enlaces de fosfato orgánico se utilizan para impulsar reacciones químicas.

La deficiencia de fósforo afecta todos los aspectos del metabolismo vegetal y el crecimiento. Los síntomas de deficiencia de fósforo son; pérdida de hojas maduras, desarrolla de antocianinas en tallos y nervaduras foliares y en casos extremos, desarrollo de áreas necróticas en diversas partes de la planta.

Las plantas deficientes son de lento desarrollo y a menudo, achaparradas, (Bidwell, 1979).

Origen del Fósforo en el Suelo

La fuente original de fósforo en el suelo es la apatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, un fosfato cálcico de baja solubilidad que constituye el principal mineral fosfatado en los suelos de las regiones áridas y semiáridas, donde el contenido de calcio es alto y el pH es alcalino; por otro lado, en suelos húmedos e inundados, el fósforo se encuentra principalmente como variscita $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, vivianita $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ y strengita $\text{Fe}_4\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, (Fassbender, 1980; Thompson y Troeh, 1980).

El fósforo en el Suelo

Las transformaciones del P aplicado ocurren dentro de un marco de las formas y reacciones de P que pueden ser descritas en forma general como el ciclo del fósforo (P), (Smeck, 1985). Un ejemplo se presenta en la Figura 2.1.

Los bajos niveles de P en solución ha conducido a muchos trabajos a describir las relaciones de éste con la reserva, desde la cual la raíz toma P para la nutrición de la planta, a otras reservas de P interactuando con el P de la fase de solución (Olsen *et al.*, 1977; Sample *et al.*, 1980).

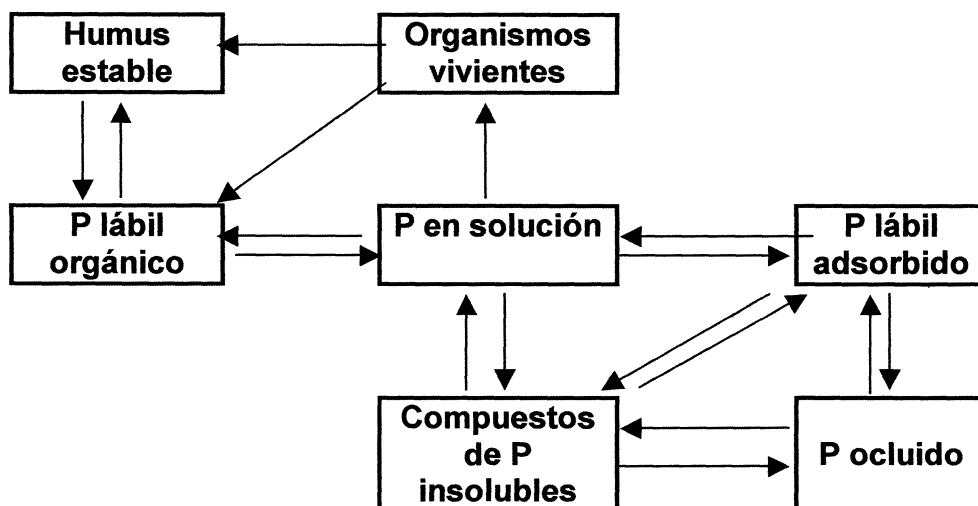


Figura 2.1. Ciclo del fósforo en el suelo. Fracciones de fósforo en el suelo.

Dalal, (1977) y Sample *et al* (1980), mencionan que mucha literatura de la ciencia del suelo se concentra en las transformaciones de P inorgánico y debería haber mayor interés en las transformaciones de P orgánico. Esto refleja el deseo de entender la disponibilidad del P como parte del agro-ecosistema, un vínculo de investigación con énfasis entre agricultura y ecología (Smeck, 1985).

Sample *et al.*, (1980) y Barber (1984), mencionan que las divisiones entre las fases sólidas inorgánicas son más que pequeñas arbitrariedades, si se considera la heterogeneidad de los componentes del suelo y que la remoción de P desde la solución del suelo posteriormente a la solubilización del fertilizante adicionado, es más probable una consecución de procesos, desde la adsorción a la precipitación, que resulta en un dinamismo de estados químicos para el P transformado (por ejemplo, adsorbido, chemisorbido, amórfico-cristalino-ocluido, precipitado), Además de que cuando se describe el status del

P en el suelo las definiciones de varias formas de reserva de P son dependientes de las técnicas de investigación escogidas.

El fósforo se encuentra en el suelo en pequeña proporción como fosfato orgánico y en su mayor parte como fosfato inorgánico o PO_4^{-3} en solución, en un suelo alcalino dominan los fosfatos de calcio; en un suelo ácido los fosfatos de hierro y aluminio (Rojas, 1972). El contenido total de fósforo varía de suelo a suelo, pero generalmente, es más alto en los suelos vírgenes en áreas en que la lluvia no es excesiva, el fósforo total en un suelo arable promedio es bajo en relación con los demás micronutrientes (Tisdale y Nelson, 1982); Ortega (1970) indica que la mayoría de los suelos tienen un contenido que puede variar de 0.03 a 0,22 por ciento de fósforo total.

Desde el punto de vista de la Nutrición Vegetal, según Larsen (1967), citado por Ortega (1986), se describe en términos de la siguiente relación:



La primera fracción (I) se define como el fosfato disuelto en la solución del suelo, el cual esta disponible para la planta, pero si no se utiliza entra rápidamente a la fracción lábil del suelo.

La segunda fracción (II) se refiere al fosfato en fase sólida, el cual está adherido en las superficies de arcillas minerales, carbonatos, óxidos, apatita,

fosfatos de hierro y aluminio, y se encuentra en equilibrio rápido con el fosfato de la solución del suelo. Esta fracción constituye una reserva natural del suelo, la cual libera el fósforo adsorbido en función de las demandas de la planta y de las propiedades físico-químicas del suelo.

La tercera fracción (III) se encuentra el fósforo cristalino, constituida principalmente por apatita y otros minerales, el fósforo que se encuentra en la fracción lábil puede pasar a la fracción (III) de manera relativamente rápida, pero de la fracción (III) pasa muy lentamente a fósforo lábil, es decir, el fosfato en esta fracción es altamente insoluble y se libera muy lentamente. Lo anterior se ilustra en la Figura 2.2.

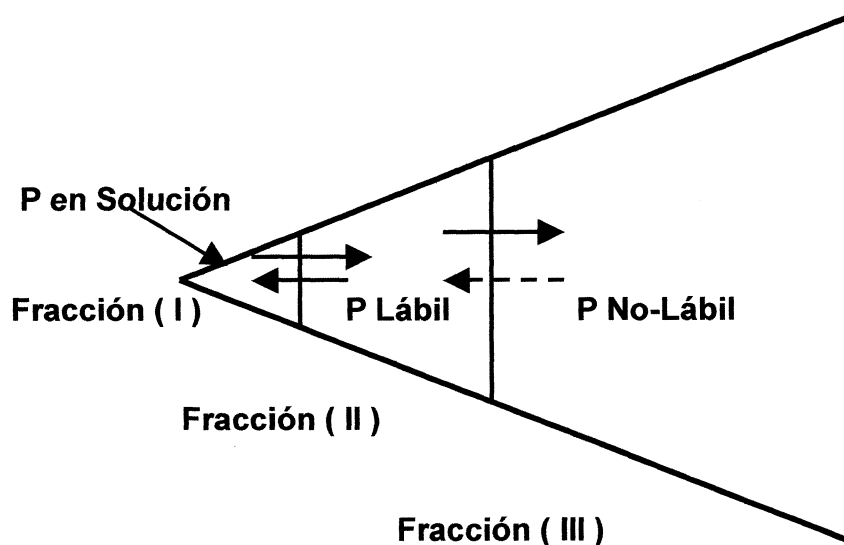


Figura 2.2. Estatus del fósforo en el suelo, que muestra las tres fracciones del fósforo en el suelo.

Las cantidades de fosfato presentes en la solución del suelo es muy baja en comparación con el fosfato adsorbido. El fosfato adsorbido excede al fosfato de la solución del suelo por un factor de 10^2 a 10^3 (100 a 1000). Es decir, que por cada 1 mg de P que hay en la solución del suelo disponible para la planta, existe en ese mismo suelo, desde 100 a 1000 mg de P adsorbidos a sus coloides.

La concentración del fosfato de la solución del suelo, lo mismo es muy diluida y en el suelo fértil arable es alrededor de 10^{-5} a 10^{-4} M. Esto equivale a cerca de 0.3 a 3 ppm de fósforo. Los iones que contienen fósforo en la solución del suelo son HPO_4^{-2} y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$. La proporción de estas dos especies de ión en la solución del suelo depende del pH. A mayor concentración de H^+ cambia el equilibrio a la forma más protonada, de acuerdo a la ecuación:



En la Figura 2.3 se muestra que a un pH de 5, el ión HPO_4^{-2} , casi está ausente mientras que un pH de 7, ambas especies de fosfato están presentes en iguales proporciones (Mengel y Kirkby 1982).

Fassbender (1980) cita que la distribución de los fosfatos inorgánicos es influenciada por las condiciones de pH del suelo. Indica que en reacciones neutras o alcalinas, predominan los fosfatos de calcio, mientras que bajo condiciones ácidas los de hierro y aluminio. Asimismo, aunado al pH, la granulometría del suelo influye en la distribución de los fosfatos inorgánicos; por

ejemplo; en los suelos arenosos predominan los fosfatos cálcicos y en los arcillosos los aluminicos y férricos. En general los hechos indican que el máximo aprovechamiento de fosfatos para las plantas se obtiene cuando el pH del suelo se mantiene entre 6.0 y 7.0 aclarando que dentro de éstos límites el aprovechamiento del fósforo es bastante bajo.

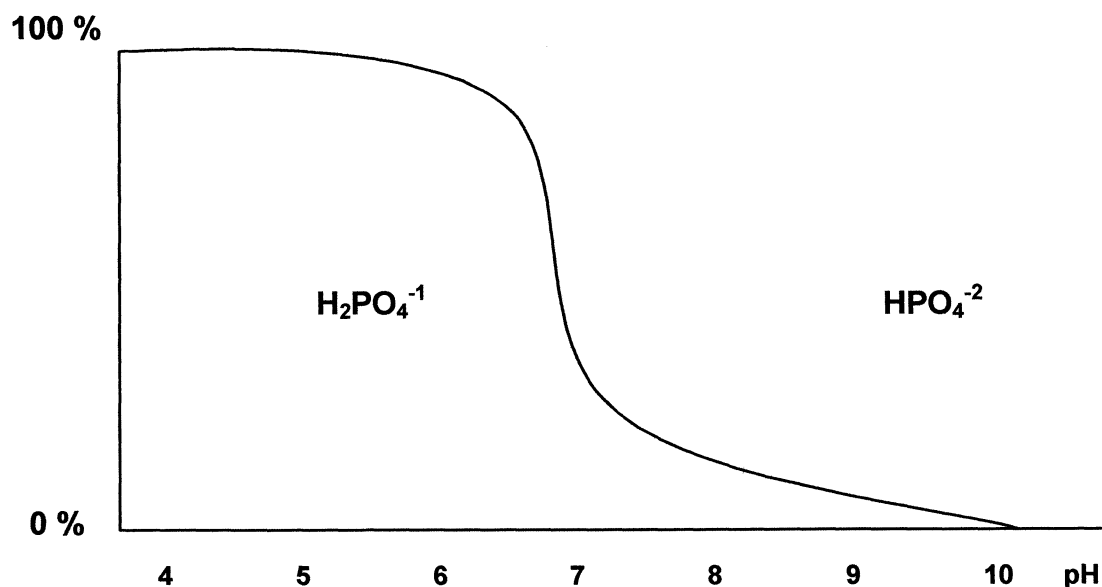


Figura 2.3. Proporción entre $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ y HPO_4^{-2} en relación al pH del suelo.

Vazquez *et al.*, (1991), indican que estudiaron el efecto sobre el fósforo orgánico (Po) y los componentes de fósforo inorgánico (Pi) de cultivos intensivos. Un suelo Typic Argiudoll fue examinado bajo tres sistemas de producción: pradera perenne, cultivo intensivo, y mezcla de pastos y uso cultivable; un suelo fue cultivado en los últimos cincuenta años y otro se cultivó por los últimos treinta años. Pequeñas modificaciones de estos suelos se determinaron en un experimento de invernadero en el cual dos sucesivos cultivos estuvieron creciendo después de un tratamiento de fertilización inicial.

El cultivo intensivo indujo una pérdida de P, la cual fue considerablemente mayor que las pérdidas de C total o N. Similarmente, decrece en pH, P extractable, P extractable con resina, P_i extraído por bicarbonato de-Na e hidróxido-Na, y el P_o extraído por bicarbonato-Na indicó pérdida de P_i disponible para la planta con variación en el uso del suelo sobre tiempo. Se observaron incrementos en algunas formas de P; el P_o extraído por Sodio-hidróxido no mostró tendencia significativa pero presenta un incremento con los años de cultivo. El P_i de la resina extractable fue la única fracción que se incrementa significativamente como un resultado de la fertilización de P. La relación observada entre el peso seco y la concentración de P de las plantas de invernadero con las diferentes fracciones de P orgánico e inorgánico sugiere que ambos tipos de determinación pueden ser usadas para predecir la respuesta del cultivo a la fertilización de P.

Sharpley *et al.*, (1989), señalan que determinaron que los valores del P orgánico, P lábil y el P adsorbido, se requieren como un grupo de datos mínimo para correr un modelo cíclico suelo-planta de P, recientemente desarrollado para los suelos continentales de los EUA. El índice de P orgánico, P lábil y el P adsorbido se relacionó a las propiedades físicas y químicas de 23 suelos calcáreos (más de 50 g CaCO₃ kg⁻¹ de suelo en contenido) y 32 suelos altamente intemperizados (mas de 30% de Al de saturación), para dar la estimación de estas formas de P a partir de los datos del suelo fácilmente disponibles. La sorción de P o el índice de disponibilidad de fertilizante se estimó como la fracción de P fertilizado remanente, como P lábil (extractado por

medio de resina intercambiable) seguido de la incubación de suelo y fertilizante. Medido por el método de Olsen para suelos calcáreos y por los métodos de Bray, Colwell, Mehlich III y Truog para suelos altamente intemperizados, el P lábil se relacionó linealmente al P de las pruebas del suelo ($R^2 = 0.71-0.90$). El P orgánico también se relacionó linealmente en todos los suelos al contenido de C orgánico y al de N total con ($R^2 = 0.87$) y ($R^2 = 0.89$), respectivamente. El índice de disponibilidad de P fertilizado decreció con el incremento del tiempo de incubación desde 30 a 180 días, con el decremento relativo a los contenidos de CaCO_3 de los suelos calcáreos y Fe y Al intercambiable de los suelos altamente intemperizados. En la actualidad, el modelo uso un valor de incubación de 180 días del índice de disponibilidad de P fertilizado, el cual se puede estimar desde los contenidos de CaCO_3 , arcilla de los suelos calcáreos y altamente intemperizados, respectivamente. Con estas relaciones, se obtuvieron simulaciones exactas de las transformaciones de P durante 60 años de cultivar una arcilla negra calcárea y el rendimiento de maíz (*Zea mays*) en dos suelos Hawaiianos altamente intemperizados que recibieron cantidades variables de P fertilizado.

Thien y Myers (1992), reportan el desarrollo de los índices de disponibilidad de P que incluyó la dinámica del P inorgánico (P_i) y el fósforo orgánico (P_o). Catorce suelos, fueron usados, fluctuando en P_i extractable por bicarbonato desde 1.5 a 21.5 mg de P kg^{-1} . Un grupo de suelos fue enriquecido con fuentes de C + N para incrementar la actividad microbiológica y crear una fuga biológica de P (suelo bioactivo). Después de 7 días de incubación, la

cantidad de P_i extractable por NaHCO_3 , P total, y además el P microbiológico inorgánico ($P_i + M$) se recuperó en ambos suelos. Estos datos se usaron para describir el tamaño de las fracciones de P lábil, inmovilizado por vía microbiana, mineralizable potencialmente, total biodisponible y biodisponible. Los suelos bioactivos siempre tienen pérdidas de P_i que los suelos no tratados después de la incubación, probablemente debido a la inmovilización microbiana. El P_o lábil en los suelos bioactivos fue 2.4 veces más grande que en los suelos no tratados. El P_o lábil después de la incubación fue 2.8 veces más grande que el nivel de P_i previo a la incubación en los suelos bioactivos y queda esencialmente el mismo en los suelos no tratados. La actividad microbiana aumentó la disponibilidad de P_o , un incremento en el fósforo disponible que puede no ser aparente en las pruebas de suelo donde las extracciones químicas miden únicamente P_i . Las reservas de P_i , P_o , y P_m fueron combinadas para crear un índice de P-biodisponible. Este índice difiere del típico índice de P suelo-prueba (P_i preincubado) mas para el suelo bioactivo que para el suelo no tratado con valores de ($r^2 = 0.50$) ($r^2 = 0.74$), respectivamente. Este dato sugiere este esquema de extracción puede aumentar el entendimiento del poder de suplementar P y la dinámica nutricional de P de ciertos suelos.

Iyamuremye *et al.*, (1996), mencionan la determinación de los efectos de diferentes enmiendas sobre la especiación química del fósforo en la solución del suelo. Muestras de suelo de un Xeric haplohumult y un Typic Vitrandept fueron tratados con 5 por ciento de estiércol o 3 veces el CaCO_3 o CaSO_4

requerido para neutralizar el Al intercambiable e incubado por 28 días. Después de la incubación las muestras se secaron al aire y luego llevadas a capacidad de campo con agua desionizada o con una solución de fósforo de KH_2PO_4 ($33 \text{ mmol P kg}^{-1}$ de suelo) y dejadas para el equilibrio por 12 horas. La solución del suelo se extrajo por centrifugación. La concentración total de metales y ligaduras inorgánicas se midieron en la solución del suelo. Se utilizó el programa de computo GEOCHEM para calcular la concentración de los metales libres, ligaduras y sus complejos. El Al y el Fe total soluble en la solución del suelo decrece al añadir el estiércol y se incrementó la base de cationes y SO_4 . El P total en solución se incremento en: las muestras que recibieron estiércol o CaCO_3 en suelo Xeric Haplohumult; y estiércol o CaSO_4 en el suelo Typic Vitrandept. El fósforo fue sobre saturado con estrenguita y el porcentaje de distribución de fosfato con respecto a este sólido decreció en presencia del estiércol. Cálculos en el producto de la actividad del ión(PAI) para varicita mostraron que el P estuvo en equilibrio con un amorfo análogo de la varicita. El citrato de los ácidos orgánicos medidos (málico, maleico, malónico, citrato, succínico, fórmico y acético) fue el único ácido orgánico que tuvo un efecto significativo sobre la especiación química. El modelo de calculo sugiere que las formas complejas del citrato soluble con Al, Ca y Fe, previenen la precipitación de estrenguita y el Ca-PO_4 sólido.

Sinclair y Johnstone, (1995), describen un modelo mecanisista simple de P en sistemas pastoriles, el cual considera el P activo en el suelo por estar en uno de dos casos: fertilizante de P no disuelto (PF) y una reserva de P lábil

disponible a la planta (PA). Disolviendo P desde PF entra a PA, y el P es perdido desde PA por inmovilización en el suelo y por la remoción neta arriba de la tierra a través de la absorción no reciclada por las plantas. Ambas transferencias son tomadas para seguir primero un orden cinético, con tasas constantes designadas como K1 y K2, respectivamente. La producción de pastura DM en cualquier año se relacionó al valor medio-anual de PA por la disminución de retornos de la ecuación de Mitscherlich, con nada de rendimiento de pasto estando asociado con cero de PA. Datos de 19 pruebas de campo con fertilizante de P (tratamientos control no fertilizados, superfosfato triple (SFT) y roca fosfórica Sechura (RFS)) en Nueva Zelanda en 1982-89 fueron combinados para dar patrones de respuestas generalizadas con los cuales se calculó el modelo. Con un valor de K1 correspondiente a casi disolución inmediata, el modelo ajusto bien para los patrones de las pruebas de P Olsen desde SFT cuando K2 correspondió a una pérdida anual de 16.3 por ciento de P en PA y a un factor de 10 fue usado para convertir P Olsen a kg de P ha⁻¹ en PA. Las curvas de respuesta del rendimiento de pasto DM a tasas de SFT en años individuales estuvieron bien ajustados para cuando el valor medio anual de PA requirió para el 90 por ciento de rendimiento relativo fue tomado como 130 kg P ha⁻¹. El modelo también ajusto bien para las diferencias entre patrones de respuesta para las aplicaciones anuales y trianuales SFT para ambas pruebas de P y la producción DM. La disminución en las pruebas de P y la producción DM la cual ocurrió en los controles de cero P fueron menores que las predicciones del modelo: esto se puede deber al pasto no fertilizado haciendo más uso del P de mayores profundidades del suelo o menos formas

disponibles. Las pruebas de P Olsen con las tasas muy altas de superfosfato triple fueron siempre mas bajas que las predicciones del modelo usando un valor para K1 derivado de mediciones químicas de valores de disolución de RFS en el proceso. Sin embargo, los rendimientos de DM de RFS generalmente se vincularon a las predicciones del modelo. Estos resultados divergentes soportan los datos independientes sugiriendo que el P disponible del suelo del fosfato reactivo de las rocas es subestimado por la prueba de P Olsen.

Mineralización de Fosfatos Orgánicos

La mineralización del P orgánico se desarrolla de acuerdo con un esquema similar al del N orgánico, así lo establecen Fassbender y Bornemisza, (1994). A partir de los compuestos polimerizados (nucleoproteínas) se forman compuestos más simples como proteínas y ácidos nucleicos, y así se libera ácido fosfórico. La participación de los microorganismos en los procesos de mineralización es muy importante; se han encontrado en promedio 30 especies de microorganismos predominantes en la mineralización del P orgánico. Estos microorganismos habitan en la rizosfera y producen la liberación de iones de fosfato que son directamente aprovechables por la planta. La actividad microbiana es afectada por diferentes factores, entre los que se destacan: la temperatura, la humedad y la reacción del suelo (pH). La mayor parte de los microorganismos del suelo (*Arthrobacter*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizophus*, *Streptomices*) no son selectivos, pero si capaces de producir fosfatasas,

nucleidasas y fitasas que catalizan el proceso metabólico. a continuación se presentan:

Bacterias: *Bacillus megatherium* var. phosphaticum
Serratia carollera var. phosphaticum
Bacillus mesentericus
Bacillus vulgatus
Bacillus subtilis

Levaduras: *Rodentrelaria mucilaginoso*

Hongos: *Saccharomyces ellipsoideus*

La mineralización de P orgánico generalmente se ha estudiado en condiciones de laboratorio, en experimentos de incubación. Este proceso es óptimo con pH altos (entre 5.5 y 7.0), con una temperatura entre 25 y 45° C y en condiciones intermedias de humedad. En condiciones de humedad cambiantes se favorece la mineralización (sequía-humedad); al humedecer una muestra de suelo seca (ajustando su tensión a 0.33 bar y someterla a una temperatura de 30°C) se produce un primer flujo de mineralización, como consecuencia de la disponibilidad de compuestos orgánicos fáciles de metabolizar. Al aumentar el P disponible, la población microbiana se desarrolla considerablemente, lo que conduce a la inmovilización del fósforo. Así se producen también en condiciones de campo, fases de mineralización e inmovilización alternas; como producto final se espera una liberación de P y una mejora en su disponibilidad. Blasco (1974), publicó los resultados de experimentos de este tipo. De manera general, la adición de glucosa y la práctica del encalado aceleran la mineralización al mejorar las condiciones de desarrollo de los microorganismos en los suelos de Costa Rica.

Bajo estas condiciones de laboratorio se han reportado dosis de mineralización de hasta $1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y día, lo que sería suficiente para la nutrición vegetal. Datos sobre ensayos bajo condiciones de campo son muy escasos (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Ejemplos sobre mineralización de fosfatos orgánicos en diferentes condiciones. (Según Bornemiza).

Lugar	Temperatura (°C)	Días	Fósforo mineralizado kg ha^{-1}
Estados Unidos	25	30	22
Ghana	27	70	54
Estados Unidos	35	30	77
Estados Unidos	40	25	90

Tomado de Fassbender, 1980.

Los datos químicos son presentados sobre el efectos de la turba seca de un suelo aluvial en un periodo de cuatro años. Además se menciona que la turba seca incremento la mineralización y los niveles de disponibilidad de fósforo. Sin embargo, el incremento de las diferencias de la temperatura de la humedad del aire reduce la disponibilidad de fósforo a las plantas.

Stewart y Sharpley, (1987), describen la distribución y los ciclos del P y el S en el suelo. Se discute las distribuciones en pedogenesis y como estos procesos afectan la disponibilidad de estos elementos en diferentes suelos y climas. Se estableció que los métodos de ese tiempo de las pruebas de suelo para P y S solamente miden formas inorgánicas en el suelo y no informa de la contribución de la mineralización de las formas orgánicas y las historias del manejo pasado. Hay una necesidad para completar el entendimiento de los

ciclos de P y S en el suelo para el desarrollo de bases mas firmes basadas en las relaciones de predicción; Esto involucra procedimientos químicos de extracción y modelación de predicción del fraccionamiento de la materia orgánica.

Adsorción de Fósforo

El término adsorción o fijación se define como el proceso efectuado en el suelo mediante el cual ciertos elementos químicos esenciales para el desarrollo de las plantas son convertidos de una forma soluble o intercambiable a una forma mucho menos soluble o no intercambiable.

El poder de fijación del fósforo en muchos suelos es tan grande que la regulación del aprovechamiento del fósforo es uno de los problemas mas difíciles en el manejo del suelo y de los cultivos.

Ortiz y Ortiz, (1984) mencionan que para el fósforo fijado se han dado las siguientes definiciones:

- ◆ Es el fósforo aplicado que no es absorbido por las plantas durante el primer año del cultivo.
- ◆ Es aquél fósforo que ha sido cambiado a formas menos solubles como un resultado de la reacción con el suelo, éste es el fósforo moderadamente aprovechable.

- ◆ Es el fósforo soluble que se ha adherido a la fase sólida del suelo en formas altamente inutilizables por los cultivos; fósforo no aprovechable; fósforo en otras formas diferentes a las moderadamente aprovechables

Existen diferentes factores en su mayoría edafológicos que determinan las causas y la intensidad de las reacciones de los fosfatos agregados a los suelos, los cuales a continuación se presentan:

- ◆ Concentración de los iones fosfato en solución.
- ◆ Tiempo de reacción.
- ◆ Efecto de cationes intercambiables.
- ◆ Efecto de las sales
- ◆ Tipo de mineral.
- ◆ pH de la solución.
- ◆ Tamaño de la partícula.
- ◆ Temperatura.
- ◆ Contenido de materia orgánica.
- ◆ La planta.

Con respecto al factor planta Cajuste (1977) establece que la planta puede afectar el estado del fósforo en el suelo, alrededor del sistema radicular de las siguientes formas:

- ◆ Al bajar el pH por excreción de CO_2 y ácidos orgánicos, los cuales hacen que los fosfatos de calcio sean más solubles.
- ◆ Al incrementar la solubilidad de los fosfatos de calcio por absorción de Ca^{+2} en unión al fósforo.
- ◆ Al aumentar la solubilidad de los fosfatos de Fe y Al por excreción directa de agentes quelatantes orgánicos o por formación de esos compuestos, producto de la descomposición de tejidos de raíces viejas.

También las plantas con sistema radical extenso tienen mayor contacto con el volumen del suelo y por ende, mayor superficie de adsorción.

Ortiz y Ortiz, (1984), explican en términos generales que el mecanismo de adsorción del fósforo es objeto de investigación continua, pero algunos experimentos sugieren que el fósforo fijado es resistente a las pérdidas por lavado, además de que el grado y mecanismo de la fijación del fósforo varía con la naturaleza y propiedades del suelo, así para los diferentes tipos de suelo se tiene que:

- ◆ El fósforo es más aprovechable en los suelos con pH 6 a 7, pero esto no indica que el fósforo sea igualmente aprovechable en todos los suelos que son ligeramente ácidos o neutros. Los suelos de textura fina tienen un poder más alto de fijación del fósforo que los suelos de textura gruesa. En este rango de pH la fijación que ocurre se debe principalmente a la arcilla coloidal y a los cationes divalentes (Ca^{++} y Mg^{++}) en la solución del suelo.
- ◆ Los iones fosfato reemplazan al silicato o radicales OH^{-1} de los coloides minerales del suelo. El fósforo fijado por la montmorillonita es químicamente más disponible y aprovechable por las plantas que el que está combinado con el aluminio, el hierro y el calcio.
- ◆ En suelos calcáreos, los iones PO_4^{-3} son precipitados como fosfatos de calcio y magnesio relativamente insolubles o como sales dobles de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \bullet \text{CaCO}_3$ ó $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2 \bullet \text{CaF}_2$, las cuales se consideran aún menos solubles que los fosfatos de calcio y magnesio.

- ◆ En suelos moderada o altamente ácidos (pH de 5.5), el aluminio y el fierro se vuelven solubles y se combinan con los iones de fosfato para formar compuestos insolubles, los cuales son de bajo grado de aprovechamiento por las plantas.

Cepeda (1983), reporta que las partículas del suelo en estado coloidal presentan una gran área superficial con abundantes cargas eléctricas, sobre las cuales se fijan iones de signo contrario. De esta manera, el CaCO_3 retiene el anión fosfato cuando esta presente en soluciones cuya concentración de P es baja.

Chai y Caldwell (1959), indican que determinaron que las principales formas en que se encuentra el P en suelos alcalinos calcáreos son los fosfatos cálcicos en forma más abundante a otros tipos de fosfatos. Coinciden en este sentido con Blanchar y Caldwell (1964), quienes constataron que aparentemente no existe una relación entre el P tomado por la planta y el total de fosfatos de calcio presentes en el suelo.

Olsen y Watanabe (1957), mencionan que la textura de un suelo influye sobre la cantidad máxima de P que puede adsorber un suelo calcáreo; esta cantidad es mayor conforme aumenta el contenido de arcilla.

Existen varios tipos de reacciones por medio de las cuales el ión fosfato es tomado de la solución y fijado por los componentes del suelo, donde se

puede mencionar por su importancia a las reacciones de precipitación y de adsorción. La explicación más acertada en las reacciones de precipitación es la formación de compuestos con cationes de calcio, magnesio, fierro, aluminio, manganeso y titanio, de la solución del suelo donde dichos compuestos son de muy baja solubilidad. Algunos productos que se han logrado aislar e identificar en estas reacciones son cristales semejantes a la palmerita, así como minerales de la serie varicita-barrandita-estrenguita (Ortega, 1981); (Buckman y Brady, 1966 y Hsu, 1965).

Sample *et al.*, (1980), indican que se identificó 32 compuestos de P cristalino además de precipitados coloidales de compuestos variables como productos de las reacciones que llevaron a cabo por la adición de varias soluciones saturadas de fertilizantes fosfatados al suelo y a varios constituyentes del suelo como CaCO_3 , Mg, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. En suelos calcáreos, cuando se añade fosfato monocálcico en particular, el producto inicial más importante que se identificó es el $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, debido a que la abundancia de calcio favorece su precipitación, elevando el pH y reduciendo la cantidad de Fe y Al en la solución del suelo, los cuales precipitan como fosfatos de fierro y aluminio. Mientras que en suelos ácidos las formas más aceptables fueron Estrengita $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y meta-Estrengita y la transformación de $(\text{Fe,Al,X})\text{PO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ a productos cristalinos menos solubles ocurre por medio de un proceso extremadamente lento.

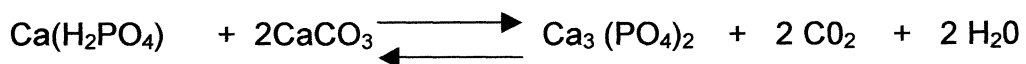
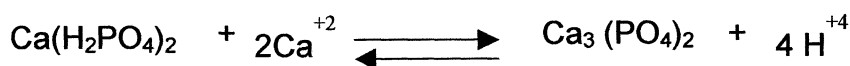
Kua y Mikkelsen (1979), señalan la habilidad del carbonato de calcio para adsorber fosfatos y que puede formarse el fosfato dicalcico y monocalcico el cual se transforma lentamente en apatitas, esto coincide con lo publicado por otros autores.

Ortega (1981) y Hsu (1965), mencionan que con respecto a las reacciones de adsorción, los óxidos hidratados de fierro y aluminio reaccionan con el ión fosfato y bajo determinadas condiciones los productos resultantes son los mismos que se describen en las reacciones de precipitación. Con el propósito de dar una explicación total de la adsorción del ión fosfato en las arcillas, se han propuesto diferentes mecanismos entre los cuales están los siguientes:

- ◆ El ión fosfato reemplaza a un hidroxilo de un ión aluminio en la superficie del coloide $(OH)_2 H_2 PO_4$.
- ◆ La unión del ión fosfato a través de los iones cálcicos en posición de intercambios $AlOH_2OH^- + Ca^+ H_2 PO_4$.
- ◆ Los iones fosfato son precipitados por los iones fierro y aluminio, y por último,
- ◆ La sustitución isomórfica de cationes con valencia menor, por ejemplo magnesio por aluminio. Como resultado de esta sustitución isomórfica queda libre una carga positiva, en la cual es posible que el fosfato puede ser adsorbido.

Chai y Caldwell (1959), señalan que al experimentar en cinco suelos de Minesota, para determinar las formas de fósforo y su fijación y comparar varios métodos para calcular fósforo aprovechable, se observó la capacidad de los suelos para fijar fósforo, añadiendo KH_2PO_4 y se concluyó que esta capacidad fijadora de fósforo de los suelos se incrementa a medida que el pH de la solución del suelo se aleja de la neutralidad. De la misma manera Buckman y Brady (1966), indican que el máximo aprovechamiento de fosfatos para las plantas se obtiene cuando el pH del suelo se mantiene entre 6.0 y 7.0. Aún en este límite el aprovechamiento del fósforo es bastante bajo y los fosfatos solubles se fijan fuertemente en el suelo. La escasa cantidad tomada por las plantas (del 10 al 30 por ciento) del fosfato añadido en un ciclo, se debe parcialmente a esta fijación.

Buckman y Brady (1965) establecen que en suelos alcalinos la precipitación de fosfatos se produce sobre todo por los compuestos cálcicos. Estos suelos se abastecen grandemente de calcio intercambiable y con CaCO_3 . Los fosfatos aprovechables reaccionan tanto con el ión calcio como con su carbonato. Al añadir superfosfato concentrado a un suelo calizo, la reacción que tendrá lugar será de la siguiente forma:



Thomson y Troeh (1980), establecen que de forma indirecta la materia orgánica influye sobre la disponibilidad del P, debido a que se enlaza y forma complejos con los iones de fierro y aluminio evitando así la formación de compuestos insolubles de P. Por otra parte, la materia orgánica en descomposición libera ácidos que aumentan la solubilidad de los fosfatos de calcio. García y García (1982), señalan que se pueden formar humofosfatos de calcio de donde se libera el fosfato por intercambio aniónico y pasa a la solución del suelo de donde lo toman las raíces de las plantas.

Peters *et al.*, (1990), describen los efectos de los métodos convencionales y biológicos de producción de cultivos en la dinámica nutrimental en suelos, se investigó en dos Podsoles en Schleswig-Holstein. Las mediciones de precipitación y de tensión de humedad del suelo se realizó quincenalmente. Los compuestos químicos en precipitación y en solución del suelo se analizaron simultáneamente, y los flujos de elementos dentro del suelo se pueden determinar por multiplicación con las cantidades respectivas de agua de infiltración. La cantidad de nitrógeno disponible de la planta no difiere con el uso de fertilizantes minerales u orgánicos. Las perdidas de nitrógeno y calcio por lixiviación fue grande en ambos tipos de cultivo, mientras que en el suelo tratado tradicionalmente, la pérdida de potasio fue muy grande, debido al uso mas extensivo de fertilizantes de potasio. El fósforo se retuvo completamente en ambos suelos. Las recomendaciones para aplicar fertilizantes se basa en estos resultados.

Precipitación de Fosfatos

Fassbender y Bornemisza (1994) declaran que en las condiciones existentes en el suelo, los fertilizantes fosfatados cuando entran en solubilidad liberan iones fosfato los cuales no son estables, es decir; no permanecen en su forma original, sino que son objeto de transformaciones continuas, que dan origen a reacciones químicas de adsorción y precipitación. Específicamente al disolverse un gránulo de superfosfato triple (fosfato mono-cálcico) se forma una solución de ácido fosfórico ácida (pH 1.8) que reacciona con los diferentes cationes existentes en la solución del suelo (Ca, Fe, Al), dando origen a la precipitación de fosfatos cristalinos o amorfos, menos solubles, de Ca, Fe y Al. En algunos casos se forman fosfatos mixtos de carácter muy complejo. Todas estas reacciones liberan energía; es decir son exergónicas.

Sample, *et al.*, (1980), reportan la precipitación de 67 fosfatos diferentes a partir de soluciones de fosfatos monocálcicos, dicálcico, monoamónico, diamónico, monopotásico y dipotásico, en diferentes condiciones de presencia de Ca, Mg, K, NH₄, Al y Fe en la solución reactiva. Estos productos de la precipitación representan, a continuación, fuentes secundarias de P para las plantas.

Fassbender y Bornemisza (1994) explican que por lo general los suelos de áreas tropicales se asocian con un pH bajo, grandes cantidades de

hidróxidos de Al y Fe gran cantidad de cargas electropositivas, y una alta capacidad de retención de P. Hay trabajos de investigación que indican que en suelos Lateríticos de Hawaii, tres días después de la aplicación de dosis elevadas de fosfatos, hasta el 96 por ciento del P aplicado se "fijó" y en su mayor proporción al Al y al Fe.

La fijación de P en algunos suelos de América Latina, se estudió mediante el uso en parte de P^{32} . Se encontraron resultados expresados como porcentaje de retención en condiciones de laboratorio a partir de $2500 \text{ mg P}\cdot\text{g}^{-1}$ suelo después de 6 hr de agitación. En estos estudios se encontró que la capacidad de fijación del P correlaciona significativamente con el contenido en materia orgánica, hidróxidos libres de aluminio y hierro y arcilla de los suelos. Los factores más importantes son el pH y el contenido de hidróxidos libres de Fe y la materia orgánica (Fassbender, 1969).

En suelos estudiados de América Central la mayor parte de los suelos retienen entre 25 y 35 por ciento del P ofrecido. La técnica aplicada permite conocer el comportamiento de un suelo ante una adición de P pero no prevé en términos agronómicos, relacionados a las condiciones de campo, la cantidad de fertilizante que se perderá ni tampoco el grado de disponibilidad de los fosfatos retenidos (Fassbender y Bornemisza, 1994).

La caracterización de los fosfatos precipitados se puede efectuar por medio de sus productos de solubilidad utilizando rayos X y microscopios electrónicos y también diferenciándolos por extracciones con métodos analíticos adecuados (Chang y Jackson, 1957).

El estudio de las formas de retención del P es tan importante como la determinación de la capacidad de retención. Su diferenciación se puede hacer mediante extractores específicos recomendados para las diferentes fracciones de fosfatos inorgánicos según el método de Chang y Jackson (1957). De acuerdo a estos autores los valores de la precipitación de fosfatos de Al, Fe y Ca es más importante que la adsorción que equivale a la fracción de fosfatos solubles en NH_4Cl . La precipitación de fosfatos de hierro predomina y tiene más importancia que la formación de otros fosfatos.

Bornemisza y Fassbender (1970) describen la importancia agronómica de la retención de P y sus formas químicas en un estudio con fertilizantes radioactivos. La respuesta a los fertilizantes disminuyó al aumentar la capacidad de fijación de P y se liga directamente a la retención superficial de P en formas solubles en NH_4Cl . La respuesta de las plantas no correlaciona con la retención en forma aluminica, ya que esos fosfatos presentan una menor solubilidad y en consecuencia, una menor disponibilidad para las plantas.

Retención del Fósforo por los Constituyentes del Suelo

Cuando los fertilizantes fosfatados se aplican a los suelos y se disuelven en el agua del suelo o se aplican como fertilizantes líquidos, ocurren reacciones entre el fósforo, los constituyentes del suelo, y los compuestos fertilizante no-fosfáticos los cuales remueven el P desde la fase de la solución y hacen los fosfatos menos solubles. Este fenómeno, llamado fijación o retención de P, se conoció desde la mitad del siglo XIX (Sample *et al*, 1980) y probablemente provocó más investigación que cualquier otro aspecto de las interacciones suelo-fertilizante-planta. A continuación se presentan algunas evidencias sobre la retención del P por los suelos, algunos factores que influyen la retención, posibles mecanismos a través de los cuales la retención puede ocurrir, y algunos de los métodos por los cuales se estudia la retención.

En una revisión sobre el tema de fijación de P, varios investigadores coincidieron y concluyeron que el carbonato del calcio y los óxidos hídricos de Fe y del Al desempeñaron papeles claves en la retención de P. Se sugirió que el P es precipitado como fosfatos de Ca-, Fe-, o Al- o que el P químicamente es unido a estos cationes en las superficies de los minerales del suelo. Por lo tanto, a partir de los primeros días las opciones de mecanismos empleados para explicar la retención de P implican precipitación o adsorción. Investigadores más modernos han propuesto varios mecanismos más refinados a través de los cuales el P, se puede retener por los suelos. Éstos incluyen:

adsorción física, quimisorción, intercambio de aniones, precipitación superficial, y precipitación de fases sólidas separadas. En general, éstos son solamente los casos especiales de precipitación o de reacciones de la adsorción.

Los primeros investigadores implicaron los constituyentes específicos del suelo en reacciones de retención del P y más tarde se investigó sobre los mecanismos involucrados en la retención de P por los minerales específicos del suelo. Las investigaciones acorde al grupo mineral, incluyendo la materia orgánica del suelo se presentan a continuación.

La Retención por los Óxidos Hídricos de Hierro y Aluminio

Los óxidos de aluminio y hierro y los óxidos hídricos aparecen como compuestos discretos en suelos o como capas en otras partículas del suelo. También pueden existir como compuestos de hidróxido de Al amorfo entre las capas de silicatos de Al expandibles. Desde 1866 con respecto a la retención de P por el suelo se encontró que los óxidos hídricos del Fe y Al retienen grandes cantidades de P de la solución y que la cantidad de P retenida en un suelo se relacionó al Fe y Al solubles en ácido hidroclicórico. Hay considerable evidencia que estos compuestos explican mucha de la retención de P en los suelos ácidos. La cantidad de P adsorbida depende del tiempo de la reacción, la temperatura, el pH y de la concentración de P de la solución del suelo (Sample *et al.*, 1980).

A pesar de sugerencias anteriores de la precipitación, el mecanismo para la reacción del fosfato con el Fe y Al hasta al principio se pensó que era un mecanismo de adsorción más bien que de precipitación, puesto que no parecía haber bastante Fe y Al en la solución del suelo para precipitar las cantidades relativamente grandes de P que podrían ser inmovilizadas. La adsorción fue propuesta para ser una reacción de intercambio entre los iones del fosfato y los iones del oxhidrilo asociados con el metal. Se predijo correctamente que la distinción entre la adsorción y la precipitación sería difícil de resolver. Uno de los principales objetivos de la investigación sobre las reacciones de P con los suelos desde entonces se dedica a solucionar este problema.

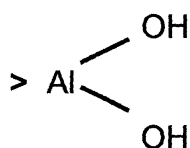
El mecanismo para retener P en suelos por los compuestos de Al y Fe aun es tema de discusión, pero en los últimos 20 años ha habido un progreso impresionante. Bache (1964) indica que midió la absorción de P por la gibsita y el óxido férrico hídrico en diferentes pH en soluciones tampón y concluyó que había tres etapas de adsorción que ocurrían en diversas concentraciones de P de la solución:

- ◆ Una alta energía de quimisorción de cantidades pequeñas de P.
- ◆ Precipitación de una fase separada de fosfato
- ◆ Una baja energía de adsorción de P sobre el precipitado.

Él concluyó que el $(Al, Fe)(H_2PO_4)_n(OH)_{3-n}$, podrían ser los productos precipitados y que n sería menor que 1 para la mayoría de los sistemas del

suelo. Además, que los precipitados amorfos tienen mucho mayor solubilidad que la variscita y estrengita.

Sample *et al.*, (1980) indican que la adsorción de P por la caolinita, gibsitita, y la pseudoboehmita fue estudiada y se encontró que las isothermas completas obtenidas no fueron conforme a un solo tipo del isoterma, al igual que otros investigadores tuvieron resultados similares. Las isothermas de adsorción se dividieron en tres regiones similares a aquellas encontradas por Bache (1964). Se sugirió que las tres regiones fueran relacionadas a la afinidad de P para por lo menos tres sitios reactivos energéticamente diferentes. Se propuso que el mecanismo para la adsorción en las regiones I y II fue el intercambio del fosfato por los grupos OH asociados a un átomo de Al cargado positivamente por la superficie de hidrólisis de los grupos OH.

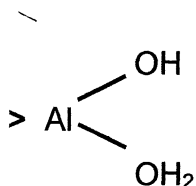


En la región I el primer grupo OH fue adherido mientras que en la región II el segundo OH reaccionó. Todos los adsorbentes se comportaron similarmente para las regiones I y II, los átomos del Al adheridos estando situados en los vértices de las caras de los cristales.

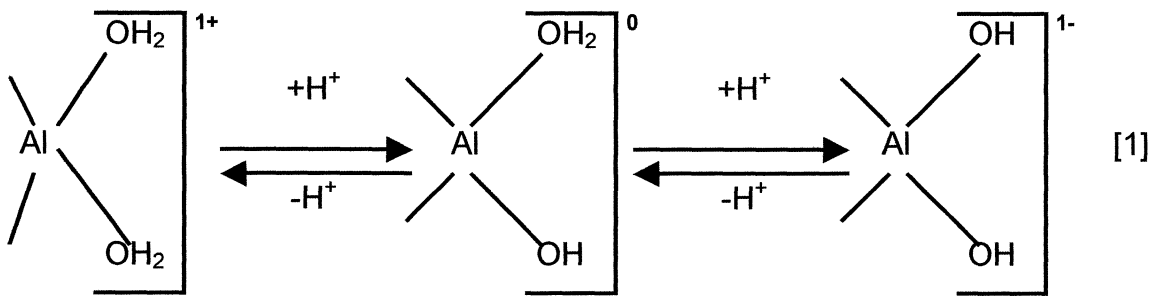
La adsorción en la región III se supuso que se presentó a través de la penetración de P dentro de una cierta región menos cristalina de la superficie de la arcilla. El fosfato adherido por la caolinita era reversible con respecto al pH

para todas las regiones, pero no con concentración de P para la región I. Con los óxidos hídricos, el P fijados en las regiones II y III eran mucho menos reversibles con respecto a la concentración que para la caolinita. Aquí se sugirió que en la desorción de P por los óxidos hídricos puede experimentar un cambio de fase. Además se sugirió que en este cambio de la fase, el P se puede adherir por dos átomos de Al que forman un anillo estable de seis-miembros.

El mismo autor indica que los aniones se pueden fijar por adsorción específicamente por los óxidos hídricos de Fe y Al. Las superficies del óxido contienen moléculas de agua y iones hidróxido los cuales son octahedricamente coordinados con el Fe o el Al. En el borde del cristal algunas moléculas de agua y oxhidrilos serán coordinados con solamente un átomo de Fe o de Al y así en el punto isoeléctrico, o cuando el cristal no tiene carga neta, la superficie puede aparecer como esto:



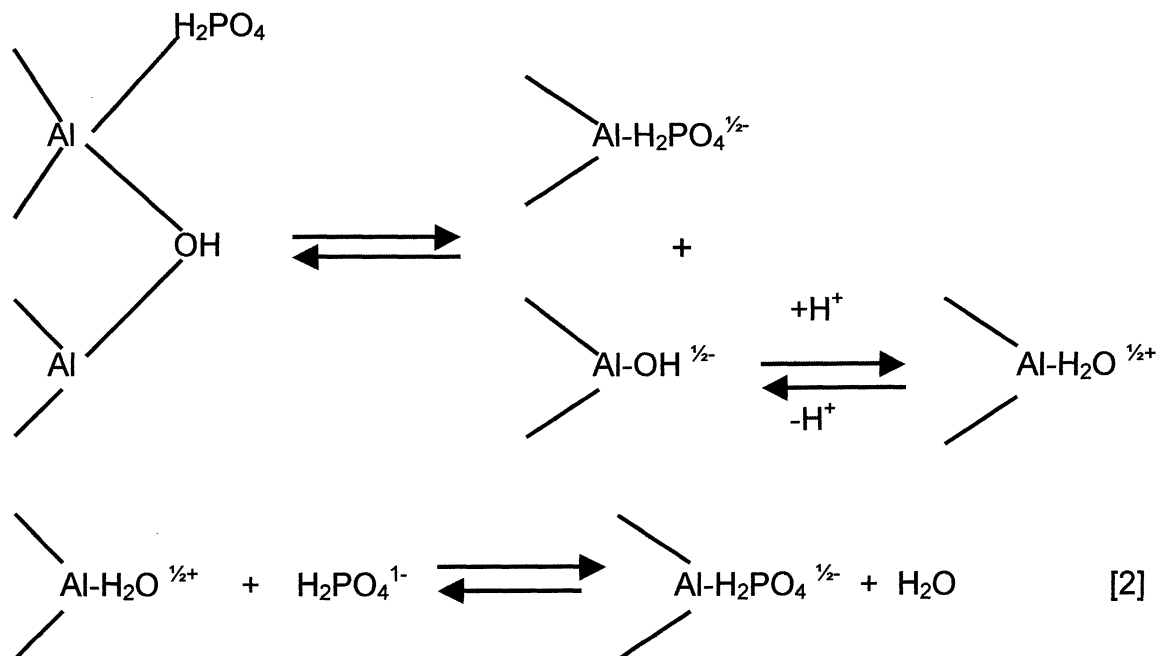
El ion del Al comparte otros cuatro átomos O dentro del cristal. Mientras que el pH aumenta, el H^+ se disocia de la molécula de agua para formar más grupos oxhidrilo y la carga en la superficie llega a ser más negativa. Inversamente, cuando el pH de la solución disminuye, la proporción de las moléculas de agua se incrementa y la superficie llega a ser más positiva, como lo presenta Sample *et al.*,(1980):



El fosfato es capaz de intercambiarse con el OH_2 y OH^- y coordinarse al ión del metal en la superficie y adsorbido específicamente. Así mismo, cuando los aniones se adsorben específicamente, toman protones de cada superficie de óxido en valores de pH debajo del punto isoeléctrico o de la disociación del ácido de sí mismo cuando la carga en el óxido es negativa. Esta carga negativa media más baja del anión permite que una conexión coordinada sea formada con el ión metálico. Como consecuencia de esto, la carga neta en la superficie se convierte en más negativa y el pH de la solución se incrementa. Esta propuesta para el mecanismo de la adsorción de P por los óxidos hídricos de Fe y Al es por lo tanto diferente a la de otros investigadores quienes pensaron que el ión fosfato es reemplazado solamente por iones hidroxilo.

Sample *et al.*, (1980) indican que algunos investigadores hicieron uso del hecho que el pH de la solución aumenta con la adsorción de P para determinar qué grupos eran reactivos cuando P fue adsorbido en diferentes concentraciones en una superficie del óxido hídrico de Al. La cantidad de hidroxilo liberado o neutralizado durante la adsorción de P fue medida en un pH constante de 5.1 y 6.2 usando un titulador automático. Se encontró que en bajas concentraciones el P substituyó principalmente grupos de agua, pero

como la adsorción aumentó y se incremento la concentración de P, más grupos hidroxilo fueron adheridos. En la máxima adsorción, el P fue principalmente reemplazado por grupos hidroxilo. Más allá de la máxima adsorción, el P fue todavía adsorbido, y se consideró que esto se logró por una ruptura de un hidroxilo unido a dos iones de Al^{3+} , ver ecuación [2].



En esta reacción un H^+ debería ser consumido por cada dos fosfatos adsorbidos.

Sample *et al.*,(1980) indica que un grupo de investigadores se basó en estudios infrarrojos y se explica que el P se adsorbió específicamente por las superficies del óxido de Fe por reemplazo de dos iones hidroxilo de la superficie adyacente. Dos átomos de oxígeno del ión fosfato son ligados a dos iones de Fe dando una superficie complejo binuclear, $[\text{Fe-O}-(\text{P}=\text{O}_2)\text{-O-Fe}]$. La estructura es similar a aquella sugerida basada en estudios de desorción. Se explica

también que calculando el número de los hidroxilos liberados, la adsorción de HPO_4^{2-} por el óxido hídrico de Al es debido a una coordinación binuclear de los iones fosfato con dos átomos Al. Así, el P puede llegar a ser fuertemente ligado a los óxidos hídricos de Al y Fe y por ende relativamente no disponible a las plantas.

Una de las consecuencias de la adsorción específica de aniones por los coloides del suelo es un aumento en la carga negativa del coloide del suelo. Varios investigadores en el pasado demostraron un aumento en la CIC de suelos con la adición de P (Sample *et al.*, 1980). El efecto de la adsorción de P en la CIC de algunos suelos tropicales ferruginosos los cuales contenían grandes cantidades de óxidos hídricos de Fe y Al ha sido estudiado. Grandes aumentos en la CIC de hasta 100 meq/100 g se obtuvieron, la relación de cambio es aproximadamente 0,8 meq/mole de P añadido. Según lo determinado con KH_2PO_4 la CIC de algunos suelos volcánicos fue mucho mayor que aquel con KCl o NaCl, y que la adsorción de P aumentó la CIC en cantidades comparables a aquella encontrada por otros investigadores. Resultados similares con respecto a la adsorción de P han sido reportados y se ha concluido que el aumento en la CIC es debido a los óxidos hídricos del Fe y Al más bien que por las capas de silicatos. Todos los autores coinciden que la adsorción específica de P es responsable del aumento en la CIC. Es decir grandes cantidades de P se requieren para los cambios significativos en la CIC; sin embargo, los efectos pueden ser importantes alrededor del gránulo del fertilizante en suelos ácidos de baja CIC.

En varios de los estudios citados, los autores concluyen que, en bajas concentraciones de P, los óxidos hídricos retienen el P a través de reacciones tipo sorción. En concentraciones más altas, la precipitación es sugerida como el mecanismo, debido en gran parte a las discontinuidades en las isothermas de adsorción convencionales; sin embargo, poca evidencia objetiva es ofrecida para la existencia de fases precipitadas separadas. Un número de investigadores, sin embargo, indican que los óxidos hídricos reaccionan con las soluciones altamente concentradas de P para formar precipitados identificables.

Al hacer reaccionar soluciones de 1.0 M de fosfatos de amonio, de potasio y de sodio con los óxidos hídricos de Fe y Al, estos últimos se descomponen, formando los fosfatos de Fe y de Al como fases cristalinas separadas. Otros investigadores también han mostrado que las soluciones concentradas de P descomponen los óxidos hídricos con la formación de los precipitados de fosfato separados. Hay estudios en donde se ha hecho reaccionar los óxidos hídricos del Fe y del Al con una amplia variedad de soluciones concentradas de P y se han identificado varios fosfatos precipitados que contenían Fe y Al.

Gunnarsson, (1987) señala que en Suecia después de la segunda guerra mundial y hasta mediados de los años setentas el uso de fertilizante de fósforo sobre la tierra agrícola se incrementó, después declinó. El lactato de amonio 0.1N y el ácido acético 0.4 N, pH 3.75 se usó como un extractor del fósforo fácilmente soluble o lábil. El valor P-Al puede formalmente ser tratado

como una reserva químicamente definida. Seis experimentos de fertilización a largo plazo establecidos desde 1957 son compuestos de dos (4 años de rotaciones) una simulando una granja con producción animal y la otra sin producción. Por cada rotación hay cuatro niveles de fósforo/potasio y cuatro niveles de nitrógeno. Dos patrones generales se detectó en los valores de P-AI determinados anualmente:

- ◆ Los niveles de P-AI aparecen para cubrir y alcanzar un estado regular después de 10 a 15 años. Donde más fósforo del que es aplicado es transferido a reservas que no son AI-soluble que aquel que es exportado por los cultivos. Los niveles del estado fijo son muy altos para la rotación con animales que para aquellos sin animales. Aproximadamente media vida del fósforo aplicado varió entre tres y diez años con 5-6 como un promedio.

- ◆ Un ciclo de cuatro años fue encontrado dentro del nivel promedio del estado fijo cuando todo el fósforo se aplicó a dos cultivos el primero y el último en los cuatro años de rotación. Virtualmente todo el fósforo aplicado podría ser acumulado en la superficie del suelo (0-25cm). Alrededor del 40 por ciento es fácilmente soluble (AI-soluble), alrededor del 50 por ciento es apenas soluble y aproximadamente el 10 por ciento es fósforo orgánico. Sin embargo, diferencias significativas se encontró entre los tipos de suelo.

Retención por los Minerales Alumino-Silicatos

Sample *et al.*, (1950) menciona que hay numerosas investigaciones de las reacciones del fosfato con los minerales arcillosos alumino-silicatos. Investigadores pioneros en este campo señalan que hay variaciones apreciables en las cantidades de P que se retuvieron por los diversos minerales; sin embargo, cuando se comparan partículas casi iguales de tamaño (iguales en áreas superficiales), las arcillas montmorillonita y caolinita retienen cantidades similares de P. Esto permite sugerir que el mecanismo para la adsorción es igual para varias arcillas. De lo anterior se desprende que hay dos mecanismos propuestos de la adsorción: el intercambio de los iones del fosfato con los grupos hidroxilo ligados a la capa de gibbsita, y como aniones intercambiables los cuales contrarrestan una posible carga positiva desarrollada por la adsorción de protones o de grupos del hidroxilo de la capa de gibbsita.

Sample *et al.*, (1980) reporta que cuando el P interacciona en suelos ácidos y neutros, las arcillas saturadas de Ca retienen más P que aquellas arcillas saturadas de Na, NH_4 , o K. Es posible que el acoplamiento de P a las arcillas minerales a través de iones intercambiables de Ca^{+2} o de Mg^{+2} pueden contribuir a la adsorción de P. Cuando se estudió la adsorción del fósforo por la caolinita, la illita, y la montmorillonita saturadas con varios cationes. El fosfato en bajas concentraciones se adsorbió de acuerdo con la isoterma de adsorción de Langmuir para todos los cationes. Las arcillas saturadas con los iones divalentes adsorbieron más P que las arcillas saturadas con los iones

monovalentes. La montmorillonita tenía una adsorción negativa cuando estaba saturada con los iones monovalentes, pero ésta cambió a una adsorción positiva cuando se añadió NaCl al O.I N. Los investigadores concluyen que a partir de estos resultados el espesor de la doble capa difusa controló como mucho P se adsorbió en la superficie de la arcilla.

Numerosos estudios de la adsorción por las arcillas minerales en las cuales una de varias isothermas de adsorción se utilizó para describir matemáticamente los datos de la adsorción. Debido a semejanzas en las isothermas de adsorción para los óxidos hidratados y los alumino-silicatos, varios investigadores han concluido que los mecanismos de adsorción son iguales para los dos grupos de minerales. Algunos investigadores indican que la adsorción de P es similar para la caolinita, la gibbsita, y la pseudoboehmita, diferenciándose solamente en el número de los sitios de adsorción. Cuando los minerales son lavados, un cambio de la fase toma lugar donde el P fue adsorbido menos reversiblemente. El cambio es mayor para los óxidos hidratados del Al que para la caolinita, una indicación que el P puede ser menos lábil. Otros autores piensan también que las caras del vértices de la caolinita se comportan semejantemente a los óxidos hídricos en la adsorción del anión.

En soluciones diluidas la adsorción de P sobre la caolinita reemplaza a las moléculas de agua adsorbidas específicamente en los vértices de los espacios interláminares de la arcilla. De lo anterior se desprende que el P es depositado covalentemente a un ión de aluminio y que el P substituye una

molécula de agua en lugar de un grupo del hidroxilo, puesto que el pH de la solución no aumenta perceptiblemente durante la reacción.

Se ha demostrado que P adsorbido en muchos aluminosilicatos amorfos sintéticos es de la misma manera como lo es con la caolinita.

En el estudio de la adsorción del fosfato por algunos suelos tropicales se encontró que la adsorción de P podría ser mejor descrita por una ecuación binaria de Langmuir, sugiriendo dos tipos de sitios de adsorción. En la primera región la adsorción de P resultó en la liberación del sulfato y silicato y de un aumento del pH, lo que indicó que el fosfato substituía el silicato, el sulfato, y los grupos hidroxilos adsorbidos. En la segunda región, en las concentraciones más altas de P, había un claro aumento en la liberación del silicato pero sin el sulfato adicional, lo que sugirió que el silicato de las arcillas minerales estaba desorganizado y la estructura desplazada, permitiendo así que más P sea adsorbido.

Estos últimos resultados son similares a estudios anteriores que señalan que en las altas concentraciones, las soluciones de P disuelven la caolinita para liberar Si y Al, con la precipitación subsecuentemente de compuestos P-Al. En concentraciones más diluidas, indican que la reacción es de adsorción con el reemplazo de los grupos hidroxilo superficiales por el fosfato.

Al igual que varios investigadores en el caso con los óxidos hídricos, para explicar datos experimentales, se recurrió a un mecanismo de adsorción en baja concentración y precipitación en alta concentración. Absolutamente, a menudo, no hay evidencia directa por una fase de precipitación separada. Sin embargo, los investigadores que trabajan con las soluciones muy concentradas de P, tienen muy poca dificultad en demostrar una reacción de precipitación asociada con las arcillas del silicato.

Sample *et al.*, (1980) señalan que se hizo reaccionar la illita, la caolinita, y la montmorillonita con soluciones de fosfatos de NH_4 , K, o Na de 1.0 M, y se encontró fases precipitadas consistentes en fosfatos de Fe y Al que contenían el catión suministrado por la solución de P. Las reacciones con las arcillas silicatadas son mucho más lentas que aquellas con los óxidos hídricos. También se señala que las soluciones concentradas de P descomponían la caolinita, resultando en la precipitación de un compuesto de P-Al. Otros autores encontraron que las soluciones concentradas del pirofosfato y del tripolyfosfato de amonio reaccionó con la montmorillonita y atapulgita para formar varios pirofosfatos de Mg-NH_4^- y Ca-NH_4^- como precipitados separados.

Retención por Carbonatos del Suelo

Se ha estudiado que la química de suelos calcáreos es dominada por los carbonatos del suelo, así como las reacciones de P con carbonatos puros. Cole *et al.*, (1953) concluyen que las reacciones de adsorción dominaron

cuando al CaCO_3 se le agregó soluciones diluidas de P, pero las reacciones de precipitación dominaron con soluciones más concentradas de P. Los mismos autores indican que la isoterma de adsorción de Langmuir describió la adsorción de P por el CaCO_3 en relativamente bajas concentraciones de P. Una abrupta discontinuidad en la isoterma con el incremento de la concentración sugiere a los investigadores que la precipitación estuvo ocurriendo. Se pensó que el compuesto precipitado era Fosfato dicalcico [CaHPO_4] o un compuesto con similares características. Se caracterizó a los productos iniciales de la reacción: como aquellos que tienen muy alta superficies específicas y mayores solubilidades que la hidroxiapatita o fluorapatita.

El mecanismo de la adsorción de P por el CaCO_3 aun no está bien explicado. Se sugirió que el P puede sustituir las moléculas de agua, los iones bicarbonato y los iones hidroxilos adsorbidos, cuando el P esta adsorbido por la calcita con fuerza adsorbente dependiendo de la solubilidad del compuesto formado con la superficie de los iones de Ca. Se mostró el valor de la máxima saturación de la superficie monocapa calculada de la isoterma de Langmuir, la cual es mucho menor para el CaCO_3 que para una caolinita saturada de Ca.

Sample *et al.*, (1980) mencionan que se estudió la cinética de las interacciones de P con la calcita y concluyen que ocurrían dos reacciones. La primera reacción en bajas concentraciones de P, consistió de la adsorción de P por la superficie de la calcita. La segunda reacción fue descrita como un proceso de nucleación de los cristales del fosfato de calcio donde hay un

rearrreglo superficial del fosfato amorfo dentro del fosfato heteronucleico el cual sustituye el cristal desarrollado. Los estudios de la solubilidad indican que en bajas concentraciones de P la hidroxiapatita se formó. En concentraciones más altas de P las soluciones se saturaron con respecto al fosfato de octocalcio. Cole *et al.*, (1953) muestran que el $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ precipitó en las concentraciones de P más altas.

La ecuación de Langmuir describe la adsorción de P por los suelos si se asume que la adsorción ocurre en dos tipos de superficies con diversas energías de vinculación. Usando esta ecuación de Langmuir de dos-superficies. En un estudio de la adsorción de P por 24 suelos calcáreos se encontró que la alta energía de las superficies de adsorción fue estrechamente relacionada a ditionito de fierro soluble, el cual indicó que hasta en suelos calcáreos los óxidos hídricos son importantes en la adsorción de P. La baja energía de adsorción fue altamente correlacionada con las áreas superficiales de CaCO_3 y el contenido de materia orgánica, pero no con el contenido de CaCO_3 . Los resultados sugieren que el P esta menos fuertemente unido al CaCO_3 que a los óxidos hidratados y así en esta forma está más disponible para las plantas Sample *et al.*, (1980).

La mayoría de los investigadores han tenido poca dificultad en demostrar reacciones separadas de la precipitación entre las soluciones de P y el CaCO_3 , incluso en relativamente bajas concentraciones. En las altas concentraciones de P, las reacciones de precipitación son copiosas y rápidas.

En estudios presentados se ha reportado que el $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y CaHPO_4 son los productos iniciales de la reacción cuando una solución saturada de fosfato monocalcico $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (MCP) se puso a reaccionar con CaCO_3 o $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Estos mismos productos se formaron cuando el CaCO_3 se agregó a los líquidos filtrados de las reacciones de los suelos y soluciones saturadas de (MCP). Cuando las soluciones se saturaron se formó fosfato monoamonico $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (MAP) y fosfato monopotasio KH_2PO_4 (MKP), $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (DCP) y CaHPO_4 (DCP), pero también $\text{Mg}_3(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, y $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Cuando el CaCO_3 , y $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ se agregaron a las soluciones saturadas de fosfato diamonio $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (DAP) y fosfato dipotasio K_2HPO_4 (DKP), los siguientes compuestos se identificaron: $\text{Ca}_2(\text{NH}_4)_2(\text{HPO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaK}_3\text{H}(\text{PO}_4)_2$, y $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Otros investigadores indican que el producto inicial de la reacción del (MCP) y de CaCO_3 es $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Sample *et al.*, 1963).

Los anteriores autores indican que se estudió la hidrólisis de $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ en la presencia de CaCO_3 y de MgCO_3 . Después de un mes, el $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se hidrolizó a la forma $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en la presencia de CaCO_3 , y después de tres meses el $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ se hidrolizó a la forma $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ en presencia de MgCO_3 . Ningunos otros productos de la hidrólisis se detectaron incluso después de 6 meses.

También se menciona que reaccionaron la calcita con una solución del tripolifosfato de amonio, uno de los ingredientes del fertilizante APP, y se encontró que se forman precipitados de tripolifosfato de $-Ca-NH_4$ y de pirofosfato de $-Ca-NH_4$. La magnesita añadida a la solución del tripolifosfato dio lugar a la precipitación de tripolifosfato de $-Mg-NH_4$.

Luque y Arambarri (1983), señalan que se estudió la distribución del fósforo en dos perfiles salinos en las marismas del Guadalquivir, una fertilizada y otra no. Se determinó el contenido de P total, P disponible y P en la solución del suelo, los factores Q e I, el fraccionamiento del P del suelo, y el contenido de óxidos de hierro y aluminosilicatos amorfos. En ambos perfiles mucho del P fue ligado al calcio. En el perfil fertilizado las concentraciones de P total y el P-Ca en la superficie del suelo es dos veces superior a aquella en los horizontes mas bajos, y las concentraciones de P total y P disponible y los factores Q e I exceden en gran medida a aquellas que se determinó en los horizontes más bajos, mientras que las concentraciones de P y los índices de disponibilidad son uniformes en todas las partes del perfil no fertilizado. Las concentraciones de P-Fe es muy bajo en ambos perfiles.

Materia Orgánica del Suelo y Retención del Fósforo

El humus, normalmente se carga negativamente, no es considerado que retiene mucho P por sí mismo en suelos; sin embargo, en asociación con cationes tales como Fe^{+3} , Al^{+3} , y Ca^{+2} es capaz de retener cantidades

significativas. Sample *et al.*, (1980) citan que se preparó un complejo de Fe, P, y del ácido humico el cual es soluble en agua y contenía grandes cantidades de P intercambiable con P^{32} . Se consideró que los complejos tales como estos son algunas de las formas en las cuales los fosfatos de Fe pueden estar contenidos en suelos neutros y alcalinos. Cuando el estiércol se añadió sobre un suelo neutro por un largo período de tiempo, la fracción del fosfato de Fe acorde al procedimiento de fraccionamiento de Chang y Jackson (1957) aumentó en cantidad así como en el porcentaje de P intercambiable con P^{32} . Este resultado estaba en armonía con la formación del complejo propuesto. En otro estudio se preparó un complejo ácido humico-Al-hidroxilo que fue capaz de adsorber P. La cantidad de P que se adsorbió aumentó conforme la relación de Al:OH disminuyó, lo cual condujo a creer que el P se adsorbió por el intercambio del fosfato ligado por los grupos hidroxilo. Se pensó que el ácido humico pudo reaccionar con el Al de los minerales del suelo para formar estos complejos, los cuales pueden dar aumento de nuevas superficies para la adsorción de P. El efecto de un aumento en el contenido orgánico de los suelo, por consiguiente se puede incrementar la adsorción de P más bien que disminuir por competir con los sitios para adsorber P.

Muchos investigadores citan que la materia orgánica afecta las reacciones de P en los suelos. Algunos muestran que la materia orgánica puede complejar iones de Ca y de este modo incrementar la concentración de P en la solución del suelo desde algunos de los fosfatos de Ca. Otros señalan que los ácidos orgánicos son capaces de reducir la cantidad de P que es adsorbido

por la caolinita, la gibsitita, y la goethita. Se pensó que los ácidos orgánicos pueden ser adsorbidos por las ligaduras de la superficies mineral y competir así con el P por los sitios de adsorción. Otros estudios han sugerido que, en suelos calcáreos, la materia orgánica y el P compiten por los mismos sitios para la adsorción en las superficies de CaCO_3 y se ha concluido que la adsorción de la materia orgánica en estos suelos disminuyó la energía de adsorción del P adsorbido. Otros autores citan que la adición del estiércol redujo la energía de adsorción de un suelo neutro para el P, pero aumentó la máxima adsorción. En contraste y posteriormente a lo anterior se señala que los ácidos orgánicos simples, el ácido fulvico, y el ácido humico no tienen ningún efecto en la adsorción de P por los suelos derivados de ceniza volcánica y concluyen que el P de estos suelos es preferentemente adsorbido en los ácidos orgánicos Sample *et al.*, (1980).

Hay evidencia que la materia orgánica puede disminuir o aumentar la capacidad de los suelos de adsorber P. Varios investigadores señalan que hay una relación positiva entre el contenido de la materia orgánica de los suelos y la adsorción de P. Esta relación refleja la asociación de la materia orgánica probablemente con los cationes tales como Fe, Al, y Ca. Estos iones son capaces de adsorber P mientras que todavía están asociados con la materia orgánica, y por lo tanto una relación positiva puede esperarse.

Al igual que el caso con estudios de adsorción de P por varios suelos minerales, mucha de la investigación sobre el papel de la materia orgánica en la

retención de P se emplean soluciones diluidas de P. En tales estudios se tienen valores en la determinación del efecto de la materia orgánica sobre la adsorción de P, pero en sentido inverso no se dispone de datos que expliquen, que efectos tienen los fertilizantes de P sobre la materia orgánica del suelo en una aplicación localizada. Hay estudios que presentan evidencia visual que el MAP y el DAP solubilizan la materia orgánica de suelo y que la materia orgánica se movió con el avance frontal de la solución del fertilizante. Otros autores citan que se aplicó MAP o pirofosfato triamónico (TPP) a un suelo en tasas para simular el ambiente cerca de una banda de fertilizante. Se encontró que arriba del 10 por ciento de la materia orgánica del suelo se alcanzó solubilizar por los fertilizantes, con el TPP se disolvió alrededor de dos veces más carbono (C) orgánico que con el MAP. Un posible mecanismo es que el NH_4^+ del MAP y del TPP reemplaza varios iones divalentes y trivalentes del metal de los complejos estables materia orgánica-metal, de este modo se hacen los complejos más solubles Sample *et al.*, (1980).

Hay tres maneras que estas alteraciones influyen las reacciones de retención de P.

- ◆ A medida que la solución del fertilizante se mueve desde un gránulo o banda en el suelo, los iones divalentes y trivalentes desplazados del metal contribuyen a la concentración de los cationes derivados del suelo disponibles para la precipitación subsecuente con P.

- ◆ El retiro de las capas de la materia orgánica en los suelos minerales puede exponer las nuevas superficies las cuales pueden participar en la adsorción de P o en reacciones minerales de la precipitación-descomposición de P.
- ◆ A medida que la materia orgánica entra en solubilidad se lleva a una nueva localización en el suelo, puede reprecipitarse, cubriendo las superficies del suelo mineral las cuales de otra manera pueden participar en las reacciones de retención de P.

De Melo, *et al.*, (1998) señalan que la dinámica del fósforo en suelos inundados tienen mucha significancia agrícola y medio ambiental. Una característica específica de tal dinámica es que esta influenciada grandemente por los cambios en las formas de Fe. Este trabajo se condujo en el laboratorio donde se investigó el efecto de continuas inundaciones y 25 ciclos día redox sobre las dinámicas de P y Fe en los subsuelos de siete Oxisoles (Orthoxs, Humoxs y Udoxs) y horizontes superficiales de 19 suelos de terrenos bajos (Fluvents y Aquepts) del estado de Minas Gerais, Brasil. Las cantidades de P y Fe extractado por el acetato/EDTA (Fe_{ae} , P_{ae}), citrato a pH 6 (Fe_c , P_c), y citrato/ascorbato a pH 6 (Fe_{ca} , P_{ca}) el cual provee una medición de las formas de Fe con solubilidad decreciente (desde Fe soluble a la más estable Ferrihidritas), se determinó antes y después de la inundación continua y tratamientos cíclicos redox. En muchos Oxisoles, las formas de Fe apenas se afectaron por inundación continua o ciclos redox. En los suelos de terrenos bajos, el Fe-acetato/EDTA y el Fe-citrato, por ejemplo, las formas de Fe más lábil, se incrementaron por tales tratamientos, particularmente en los suelos de

más contenido de materia orgánica. En contraste, no cambió o decreció el Fe-citrato/ascorbato, lo que sugirió que (i) cantidades no significativas de hidróxidos de Fe cristalino se redujeron y transformaron a formas más solubles y (ii) el incremento de Fe-acetato/EDTA y el Fe-citrato es ampliamente el resultado de la transformación de alguna de las formas menos solubles de Fe-citrato/ascorbato. La inundación continua y ciclos redox también inducen cambios en el P-acetato/EDTA, P-citrato y P-citrato/ascorbato que resultó ser muy grande en los suelos de terrenos bajos que en los Oxisoles, pero no apareció un consistente incremento o disminución en cualquiera de estas formas de P extractable. Sin embargo, en promedio el P-citrato/ascorbato se incrementó lo que sugirió que algo de P orgánico se mineralizó. Como un resultado de los cambios que se mencionó en las formas de Fe y P, en promedio, la relación molar de P/Fe decreció en las formas más solubles de Fe (extractable en acetato/EDTA y citrato) y se incrementó en las formas menos solubles de Fe (extractable en citrato/ascorbato).

En el tratamiento de inundación continua, la concentración de Fe y P en solución generalmente se incrementó a partir del día 20 al 50 y entonces decreció; la concentración de P ocasionalmente mostró un segundo máximo después del 50 a los 170 días de inundación continua, causado probablemente por la mineralización de la materia orgánica. Después de 209 días de inundación continua, la concentración de P en solución es del mismo orden de magnitud, así como al principio de la inundación. La concentración promedio de Fe en solución durante el periodo de inundación se relacionó al Fe-

acetato/EDTA y al Fe-citrato/ascorbato. La variable más conveniente para predecir el promedio de la concentración de P en solución es P-citrato/ascorbato. La varianza para esta variable se incremento significativamente desde del 33 al 66 por ciento cuando la arcilla y el Fe extractable por citrato/bicarbonato/ditionito se incluyó como variable en la regresión. Esto sugiere que la concentración de P en solución es controlada por la cantidad de P liberado en reducción de las formas de Fe extractable por citrato/ascorbato y por las propiedades de la adsorción de P de los minerales cristalinos del suelo (kaolinita, gibsita, gohetita, y hematita). Se sugirió que los métodos acetato/EDTA y citrato/ascorbato se podrán usar para evaluar la disponibilidad de Fe y P en sedimentos y suelos anegados, si hay análisis de materia orgánica y capacidad de adsorción de fosfatos.

Oberson, *et al.*, (1993) citan que se estudio los efectos de los sistemas de cultivo convencional y biológico sobre la dinámica del P del suelo a través de parámetros de medición algunos micro-biológicos después de 13 años de diferentes sistemas de cosecha en sitios en Therwil, Suiza. Los tratamientos se formaron por el control, bio-dinámico, bio-orgánico, lotes convencionales y un tratamiento de fertilizante. Los sistemas de cultivo principalmente difieren en la forma y cantidad de nutrientes aplicados y en las estrategias de protección de las plantas. Los resultados de un procedimiento de fraccionamiento secuencial nostró que sin tener en cuenta la forma del P aplicado, ni el P extractable orgánico (extraído por 0.5 M de NaHCO_3 o 0.1 M de NaOH), únicamente las acciones inorgánicas, se afectaron. El P residual orgánico, no extractado por

NaHCO_3 o NaOH se incrementó en los lotes bio-dinámico y bio-orgánico. La biomasa de la microbiología del suelo (contenido de ATP) y la actividad de la fosfatasa ácida también es muy alta en ambos sistemas manejados biológicamente. Estos resultados se atribuyeron a la muy alta cantidad de C orgánico y al P orgánico en estos sistemas, pero también a la reducción severa o a la ausencia de la protección química de las plantas. La relación entre la fosfatasa ácida del suelo y el P orgánico residual es interpretada como una indicación de que esta fracción puede ser involucrada en transformaciones en corto plazo. Las mediciones de los factores intensidad, cantidad y capacidad de P del suelo disponible cuando se usó el método cinético de intercambio isotópico de P-32 muestran que el P no puede ser el factor limitante del rendimiento del cultivo en el sistema de cultivo biológico. Los parámetros cinéticos describen la habilidad de los iones de P para dejar la fase sólida del suelo, derivado del intercambio isotópico, es significativamente muy alto para los tratamientos bio-dinámicos que para todos los otros tratamientos. Estos resultados, muestran una modificación de vínculos químicos entre los iones de P y la matriz del suelo, lo que se explica esto por los muy altos contenidos de Ca y materia orgánica en este sistema.

Factores Intensidad y Cantidad

Mengel y Kirkby (1982) señalan que las plantas deben estar administradas adecuadamente con nutrimentos durante el período entero de desarrollo, por esta razón la concentración de los nutrimentos en la solución del

suelo se debe mantener en un nivel satisfactorio para el desarrollo de la planta, la actividad de los nutrientes depende por consiguiente no solo de la solución del suelo en cualquier tiempo determinado, sino también en la habilidad del suelo para mantener la concentración del nutriente, esta capacidad de un suelo para "amortiguar" la concentración del nutriente de la solución del suelo es un factor importante en la actividad o eficacia del nutriente.

Generalmente aquellos nutrientes que se requieren en altas cantidades por las plantas, están presentes en la solución del suelo en concentraciones relativamente pequeñas, como es el caso particular del fósforo. Los mismos autores establecen que cuando se ha calculado en la solución del suelo el contenido de fósforo, se encontró alrededor de 0.5-1.0 kilogramo de fósforo por hectárea, mientras que un cultivo de cereal requiere cerca de 20 kilogramos de fósforo por hectárea. Bajo estas condiciones, el cultivo de cereal no necesariamente presenta una deficiencia de fósforo. Lo que demuestra que la remoción del fósforo de la solución del suelo por el cultivo puede ser acompañada por un relleno sustancial de la solución del suelo desde la fase sólida del suelo.

Khasawneh (1971) establece que hay tres factores que interactúan para determinar el parentesco funcional entre los requerimientos de un ión y el estatus de los iones en un crecimiento regular o medio, siendo estos:

- ◆ Factor intensidad: este describe la fuerza de un ión en solución y se expresa como la concentración del ión en solución o bien como la actividad química de ese ión.
- ◆ Factor restituidor: Este factor describe el proceso por el cual la concentración de un ión en solución es restituida inmediatamente cuando ésta es disminuida por el requerimiento. Este factor es el resultado de la interacción de los factores cantidad, intensidad y la capacidad amortiguadora (buffer), que son mutuamente dependientes. La medida de la cantidad de nutrimentos en reserva (pool) es (q) y la capacidad buffer (B) mide la resistencia del sistema suelo al cambio en intensidad (I) y es definida como:

$$B = \frac{\Delta Q}{\Delta I}$$

- ◆ 3. Factor relativo: Este factor describe el efecto de las interacciones iónicas sobre los requerimientos del ión. El requerimiento de un ión puede ser influido por la concentración y presencia de otros iones, así las necesidades del ión están dependiendo de las interacciones de estos tres factores. Este factor describe la interacción fisiológica de las raíces con su medio ambiente, el cual se describe químicamente por los dos primeros factores.

Fox (1981) explica que la concentración de fósforo en solución es un estimativo de la intensidad de fósforo en la nutrición, ya que el fósforo en la solución del suelo es extremadamente diluida y es continuamente renovada; de lo contrario decrecerían rápidamente las concentraciones mientras que el fósforo del suelo es usado por las plantas. Un flujo alto de fósforo hacia las

raíces, es posible siempre y cuando las concentraciones de fósforo son bajas, si las soluciones bañan la superficie de la raíz, son rápida y continuamente renovadas con fósforo.

Holford y Mattingly (1976) citan que en suelos que se cultivaron intensamente con centeno forrajero (*Lolium multiflorum* lam) se hizo un intento para determinar la importancia relativa de los factores cantidad e intensidad, se estableció que, la cantidad de fósforo viene en vías de aumentar importantemente con el progreso del tiempo y el avance del ciclo del cultivo. Sin embargo, la extrapolación de estos datos sugiere que la intensidad es el factor dominante, ya que influenció la nutrición de fósforo del centeno forrajero en suelos no estresados. Con respecto a esto Fox (1981) indica que la condición de no estrés del suelo es más indicativo de condiciones del campo que de aquellas las cuales resultan del prolongado cultivar en los estrechos confines de un pequeño depósito de barro u otro tipo de material.

Gunary y Sutton (1967) señalan que para el requerimiento de fosfato a corto y largo plazo, para el crecimiento del centeno forrajero en macetas, se correlacionó bien en ambos casos con combinaciones del logaritmo de la concentración del fosfato en solución ($\log [P]$), con un factor capacidad (valor L). Esto sugiere que las mediciones del $\log [P]$ en la relación intensidad/cinética condujo a la estimación de los factores intensidad, razón y difusión. Además se concluyó que en suelos de estatus normal de fosfato, el factor capacidad tendió a ser el más importante, lo que advirtió un agotamiento local del fosfato lábil,

mientras que en suelos enriquecidos, la relación intensidad/cinética medido por el $\log[P]$ es dominante para ambos requerimientos.

Khasawneh (1971) aclara que los requerimientos de un ión dado dependen no solamente en la actividad de ese ión en solución, sino también en la actividad de otros iones y la relación que existe entre los iones en solución y el intercambio de iones de la fase sólida.

Holford (1976) cita que en un experimento de invernadero utilizó el rendimiento del centeno forrajero, para estimar el requerimiento teórico del fertilizante fosfatado y encontró que este requerimiento está en función de tres parámetros: (i) cantidad de fósforo requerida por la planta para un óptimo rendimiento, (ii) cantidad de fósforo del suelo requerido para mantener una concentración suficiente en la solución del suelo y (iii) cantidad de fósforo lábil del suelo.

El mismo autor indica que a causa de un largo efecto sobre el parámetro (ii), la capacidad buffer del fosfato tiene un importante efecto sobre el parámetro (i). Sin embargo (i) no se puede relacionar directamente con la capacidad buffer del fosfato si (iii) es ignorado. En suelos de similar (iii) aumentos de la capacidad buffer casi siempre tienen un efecto positivo sobre (i), pero un efecto ambiguo en aquellos de igual intensidad (I).

Caracterización de las Reacciones de Adsorción

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución. Esta interfase se puede hallar entre un líquido y un gas, un sólido, o entre dos líquidos diferentes.

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción. Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de la isoterma fueron desarrolladas por Freundlich, Langmuir, Bache y Williams y por Brunauer, Emmet y Teller o las modificaciones de éstas con más frecuencia se han utilizado.

Estas ecuaciones de adsorción describen la remoción de P desde las soluciones diluidas de los suelos o los constituyentes del mismo. Una descripción general de varias ecuaciones es dada a continuación. Según lo que indica Olsen y Khasawneh, todos se basan en la ecuación fundamental:

$$q = f(c) \quad (1)$$

donde: q es la cantidad P adsorbido en la concentración c de P.

Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es una de las primeras ecuaciones usada en los estudios del suelo, el autor encontró que los datos de adsorción de muchas sustancias diluidas se ajustaban a la expresión matemática siguiente:

$$\frac{x}{m} = (K_f) (C_e)^{1/n} \quad (2)$$

En donde:

x/m = cantidad adsorbida de iones adsorbidos por unidad de peso del adsorbente

C_e = concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción

K_f, n = constantes empíricas

Es probablemente la primera ecuación usada en los estudios del suelo. Originalmente, la ecuación era empírica, sin una base teórica, pero en los estudios de Olsen y Khasawneh citan varios investigadores que muestran que la ecuación de Freundlich implica que a medida que aumenta la fracción de superficie cubierta la energía de adsorción disminuye en forma logarítmica, una condición con frecuencia atribuida a la adsorción de P por los suelos. Por otro lado, significa que la energía de adsorción sobre una superficie uniforme es independiente de la superficie cubierta.

La constante de la isoterma de Freundlich se determina representando gráficamente la relación entre (x/m) y C , empleando la ecuación (2) reescrita en

la forma:

$$\log \frac{x}{m} = \log (K_f) + \frac{1}{n} \log (C_e) \quad (3)$$

El grado de mayor de flexibilidad de esta ecuación que proporciona el ajuste de la curva por dos constantes empíricas (k y n), no garantiza exactitud, si se extrapolan los datos más allá del rango experimental. Esta ecuación tiene un inconveniente grave, no predice la capacidad máxima de adsorción. A pesar de esta limitante su uso es común y forma parte de varios modelos para predecir el comportamiento de los nutrientes y pesticidas en el suelo

Isoterma de Langmuir

Originalmente la ecuación de Langmuir se derivó de la teoría cinética de los gases para describir la adsorción de los gases en los sólidos. Esta derivación se basó en tres supuestos:

- ◆ Una energía constante de adsorción, la cual es independiente de la cantidad de la superficie cubierta (esto es, una superficie homogénea).
- ◆ Adsorción en tipos específicos, sin interacción en las moléculas del adsorbato.
- ◆ Que la adsorción máxima posible corresponde a la de una capa monomolecular completa sobre todas las superficies reactivas del adsorbato.

La isoterma de Langmuir que se obtuvo en base a consideraciones racionales, se define así:

$$\frac{x}{m} = \frac{(b)(K)(C_e)}{1 + (K)(C_e)} \quad (4)$$

x/m = Cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente

C_e = Concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción

K = Es una constante relacionada a la fuerza de unión

b = Es la cantidad máxima de adsorbato que puede ser adsorbida

El equilibrio se alcanza cuando la velocidad de adsorción de los iones o las moléculas sobre la superficie adsorbente es la misma que la velocidad de desorción o liberación de estos iones o moléculas de la superficie coloidal. Así pues, la velocidad a la que se lleva a cabo la adsorción es proporcional a la fuerza que la produce, que corresponde a la diferencia entre la cantidad adsorbida para una cierta concentración y la capacidad de adsorción a dicha concentración. A la concentración de equilibrio, esta fuerza es nula.

La correspondencia de los datos experimentales con la fórmula de Langmuir no significa que las hipótesis realizadas sean válidas para el sistema particular que se estudie, puesto que la no validez de las hipótesis se puede traducir en un efecto nulo. Las constantes de la ecuación de Langmuir se

pueden determinar graficando $C/(x/m)$ frente a C empleando la ecuación (4) expresada en la fórmula:

$$\frac{(C_e)}{x/m} = \frac{1}{(K)(b)} + \frac{(C_e)}{(b)} \quad (5)$$

Se mencionó que la ecuación (2) se derivó suponiendo una energía constante de adsorción, condición que raramente ocurre en la naturaleza. En la realidad, la energía de adsorción tiende a disminuir a medida que se incrementa la extensión de la superficie, mientras que la interacción entre los iones y/o las moléculas previamente adsorbidas tiende a aumentar cuando la extensión de la superficie se incrementa. El efecto neto es que los dos cambios se tienden a compensar uno a otro, produciendo una energía de adsorción relativamente constante. La ecuación de Langmuir está limitada al rango de valores para los cuales los datos experimentales están disponibles. Aún en aquellos sistemas en donde la energía de adsorción no es estrictamente constante, esta ecuación puede describir la adsorción sobre una porción del rango de adsorción, ya que la variación en energía de adsorción sobre dicho rango puede ser pequeña si solamente predomina un tipo de sitio de enlace o un mecanismo.

Cole *et al.*, (1953) aplicó la ecuación de Langmuir para describir la adsorción de P por el CaCO_3 y posteriormente se utilizó por primera vez para describir la adsorción de P por los suelos por Olsen y Watanabe (1957).

Una ventaja de usar la ecuación de Langmuir para describir la adsorción, es que define un límite finito de adsorción sobre un conjunto de sitios los cuales cumplen con el criterio del modelo de Langmuir. Esta capacidad se utilizó por muchos investigadores para estimar la capacidad total de adsorción de los suelos para varios adsorbatos, tales como los fosfatos, plaguicidas y herbicidas. Si se comparan dichas capacidades pueden también surgir los mecanismos de adsorción.

Isoterma de Temkin

La ecuación de Temkin, cuando se propuso para el uso en los sistemas suelo-P por Bache y Williams (1971), se considero también que la energía de adsorción decreció cuando la cantidad de P adsorbido se incremento. En el rango medio de la adsorción de P la ecuación se puede expresar como:

$$\frac{q}{b} = \left(\frac{RT}{B} \right) \ln Ac \quad (6)$$

en la cual A y B son constantes y q , b , y c son como en la ecuación de Langmuir.

Las tres ecuaciones requieren que existan condiciones de equilibrio, un estado que raramente se alcanza en los estudios de la adsorción de P en los suelos Sample *et al.*, (1980). Otra situación que se asume en las tres ecuaciones es que la adsorción es reversible; sin embargo una cierta porción

del P fijado por los suelos se fija casi siempre irreversiblemente. A pesar de éstas y otras desventajas, las tres ecuaciones se han utilizado para describir la relación entre c y q sobre rangos limitados de concentraciones. El rango de conformidad raramente alcanza 100 ppm de P para cualquiera de las ecuaciones. Una anomalía del uso de estas ecuaciones de adsorción es que, sobre los rangos de concentración en los cuales ellas describen adecuadamente la relación entre c y q , no ofrecen ninguna pista en cuanto a los mecanismos de la adsorción de P por los suelos. No muestran si los óxidos acuosos del Fe o Al, arcillas silicatadas, CaCO_3 , o MgCO_3 dominan las reacciones de adsorción. No indican si la adsorción implica el reemplazo del hidroxilo, el reemplazo de la silica, o el reemplazo del bicarbonato. Los casos de inconformidad de los datos de adsorción a las varias ecuaciones han conducido a más especulación sobre los mecanismos que aquellos de conformidad.

Sample *et al.*, (1980) cita que las discontinuidades en las isotermas de adsorción condujo a proponer tres diferentes sitios de adsorción en la caolinita y los óxidos de aluminio. Bache (1964) indica que lo anterior condujo a sugerir un proceso de tres estados involucrando la quimisorción, precipitación, y una adsorción de P sobre el precipitado, y otros autores proponen dos tipos de sitios de adsorción, uno que involucra intercambio de aniones y uno en muy altas concentraciones que implica interrupción estructural de las arcillas del silicato.

Las discontinuidades en las expresiones simples de adsorción en concentraciones relativamente bajas de P condujo a un número de

investigadores a modificar las ecuaciones, así de este modo se extendió el rango de conformidad. Gunary (1970) añadió un término de raíz-cuadrada a la expresión de Langmuir y extendió el rango de la concentración sobre el cual la adsorción se describió. Fitter y Sutton (1975) citan que se mejoró el rango del ajuste conveniente de la ecuación de adsorción de Freundlich cuando se añadió un término relacionado con la reserva del P nativo del suelo. Se encontró por varios investigadores que una ecuación multisuperficie de Langmuir es aplicable a la adsorción de P por los suelos sobre amplios rangos de concentración que la ecuación de superficie única de Langmuir.

En Sample *et al.*, (1980) se menciona que estos autores y otros investigadores como Syers *et al.*, (1973), han utilizado ecuaciones similares a:

$$q = \frac{k' b' c'}{1 + k' c'} + \frac{k'' b'' c}{1 + k'' c} \quad (7)$$

Los exponentes refieren a dos superficies de adsorción. Estas modificaciones han permitido que las ecuaciones de adsorción extiendan su rango de utilidad, estas ecuaciones ofrecen poco más de información sobre los mecanismos actuales de adsorción, que las originales.

La mayoría de los modelos de la adsorción no explican la variación máxima de adsorción en diferentes valores de pH y concentraciones de soluciones, ni para las energías de adsorción en diferentes niveles de P

adsorbido. Varios investigadores señalan que se derivó una ecuación mecánica la cual predice que el incremento de carga negativa con incrementos de adsorción de P produjo decrementos de energías de adsorción. Posteriormente se da a conocer un modelo que también postula una máxima adsorción común en todos los valores de pH y fuerzas iónicas. Estos avances se aplico a la adsorción de P sobre las superficies del óxido de Fe, pero no se aplico a los sistemas completos del suelo.

El acoplamiento de varias medidas físicas con estudios de adsorción tradicional ofrecen un campo en la investigación de estos mecanismos. Un ejemplo es el trabajo de Parfitt *et al.*, (1975) que señala que utilizó los espectros infrarrojos para estudiar la adsorción de P a las superficies del óxido de Fe.

Isoterma de Breunauer, Emmett y Teller. (BET)

Muchos gases y vapores adsorbidos por sólidos no producen una isoterma que describa una adsorción de una capa monoiónica o monomolecular, sino más bien indican una adsorción en más de una capa, la Isoterma de Breunauer, Emmett y Teller (BET), describe detalladamente este fenómeno. Este tipo de adsorción en más de una capa, es típico de atracciones físicas o fuerzas de Van der Waals. Frecuentemente procede sin límite aparente, ya que este tipo de adsorción se mezcla directamente dentro de la condensación capilar a medida que la presión de vapor se acerca a su valor de saturación.

La ecuación BET se utiliza a partir de datos de adsorción para la determinación del área superficial de los sólidos. Ya que esta ecuación además de predecir la forma de la isoterma de adsorción también proporciona el volumen de gas requerido V_m para formar una sola capa. La ecuación de BET tiene la forma de:

$$A = \frac{V_m}{V_o} (N_a) (A_m) \quad (8)$$

En donde:

V_o = Volumen molar del gas adsorbato (22.400 Cm³ a 0° C)

N_a = Número de Avogadro

A = Área de superficie del adsorbente

A_m = Área transversal de la molécula del adsorbato

Frecuentemente las determinaciones del área de superficie se conducen a partir de la adsorción de N₂ sobre el sólido a una temperatura de -195°C. Para el gas N₂, el valor $A_m = 16.2 \text{ \AA}$.

La forma lineal de la ecuación BET es:

$$\frac{P}{V(P_o - P)} = \frac{1}{(V_m)(C)} + \frac{(C-1)P}{(V_m)(C)(P_o)} \quad (9)$$

En donde:

P = es la presión de equilibrio a la cual un volumen V de gas es adsorbido

P_o = es la presión de saturación del gas

C = es una constante relacionada al calor de adsorción del gas sobre el sólido en estudio

Si se grafica $P/V(P_0 - P)$ da por resultado una línea recta; el área de superficie efectiva del sólido es calculado después de determinarse el valor C , ya sea a partir de la pendiente de la línea $(C - 1) / V_m C$ ó a partir del intercepto $1/ V_m C$.

La ecuación BET se emplea para el estudio de la adsorción de algunos pesticidas con presiones de vapor altas. También se usa, aunque con menos frecuencia en los suelos, ya que se prefiere en este caso las ecuaciones de Freundlich y Langmuir.

Aplicaciones de las Isotermas de Adsorción

Existen numerosos ejemplos en la literatura de la aplicación de las isotermas de adsorción de Langmuir y de Freundlich, a la adsorción de nutrientes por el suelo o por materiales derivados de suelos, incluyendo macro o micronutrientes.

Fernandez, (1991) cita que se correlacionó las características físico-químicas del suelo a parámetros obtenidos por la aplicación de las ecuaciones de los índices de adsorción de Langmuir (una y dos superficies), Freundlich y Gunary.

Ellis y Knezek (1983) reportan que la adsorción de sulfatos por suelos se apegaba a la ecuación de Freundlich. Los mismos autores señalan que la

adsorción del Mo por suelos podría describirse por la ecuación de Freundlich si ésta era modificada para incluir un término para el pH. En otro estudio se encontró que la adsorción de Cu por las arcillas y cuarzo seguía la isoterma de adsorción de Freundlich.

Olsen y Watanabe (1957) citan que se aplicó la isoterma de adsorción de Langmuir para la adsorción de P por los suelos, con el objeto de determinar la adsorción máxima de P de los mismos.

Otro estudio explica que una adsorción de B por los suelos se adecuó a la ecuación de Langmuir y se encontró que la adsorción máxima estaba relacionada con el pH del suelo. Varios investigadores coinciden en que la ecuación de Langmuir es adecuada para un rango limitado de concentraciones de boro (B).

Varios investigadores reportaron que la adsorción de azufre (S) es descrita por la ecuación de Langmuir, aunque no siempre los datos se apegaban a esta ecuación. Otros autores señalan que se describió dos reacciones de adsorción distintas para la adsorción del Mo en hematita a un pH 4.0. Mientras que en otra investigación se encontró que se pudo describir la adsorción del Zn en suelos calcáreos por la ecuación de adsorción de Langmuir a bajas concentraciones en solución. Ellis y Knezek (1983)

Houng y Lee, (1998) renovó las opiniones sobre el uso de la ecuación de adsorción de Langmuir para describir los datos de adsorción en términos de subalternas suposiciones sobre el manejo de la ecuación de Langmuir. La máxima adsorción, que es el parámetro que se obtiene por aplicar la ecuación de Langmuir para los datos experimentales y los cuales se usan para caracterizar el adsorbente, puede ser erróneo completamente si los datos experimentales no cubren un rango suficiente de concentraciones de adsorbato y de otras condiciones, tales como el adsorbato que reside inicialmente sobre la adición experimental de adsorbato, predominante.

Houng y Lee, (1998) cita que examino tres transformaciones lineales de la forma original no lineal y comparo los resultados de adsorción de fosfato, zinc, y cobre por el suelo y la adsorción de lysosyme por arcilla. Concluyo que la prueba de linealidad es inadecuada porque la transformación lineal reduce la variabilidad y siempre provee un coeficiente de correlación estadística significativa. Enfatizo que las isothermas deben ser examinadas en la forma original, y si ellas no muestran la correcta forma y únicamente datos de concentraciones bajas son usados, la ecuación puede proveer una estimación de la máxima adsorción con un error de 50 por ciento o más.

Houng y Lee, (1998) explica que se propuso el uso del complicado método de ajuste de curva de cuadrados menores no lineal (NLLS) para determinar cada una de las constantes de la ecuación de Michaelis-Menten o la isoterma de adsorción de Langmuir de datos experimentales. Las desviaciones

estándar de los puntos individuales experimentales son usualmente no obtenidos, y así de este modo todos los puntos son igualmente complicados, por ejemplo, por un factor cargado de unidad. Desde la aplicación del complicado NLLS para un grupo de datos simulados tipo Langmuir con valores de parámetros dados, concluyen que el complicado método NLLS rindió más exactitud y preciso estimaciones de los parámetros. Finalmente se comenta que la transformación lineal de la ecuación original de Langmuir cambió el contenido de los cuadrados de los errores que es minimizado en el método de los cuadrados menores.

Frecuentemente los datos experimentales parecen ajustar las ecuaciones de Langmuir y Freundlich como se explica en varios trabajos de investigación. Mas refinadas formas de ecuaciones de adsorción se han revisado y el acercamiento estadístico por procedimientos de optimización de parámetros se han propuesto y discutido en detalle. Recientemente dos investigadores aplicaron estos procedimientos para describir la adsorción de Zinc y Cadmio en dos suelos, Houg y Lee, (1998).

Houg y Lee (1998), señalan que se comparó el ajuste de las curvas lineales y no lineales de Langmuir y Freundlich en el estudio de la adsorción de cobre, cadmio y plomo en suelos de Taiwan. Se encontró que en la ecuación de adsorción de Langmuir, $q = MbC/(1+bC)$, el parámetro b se identificó como el recíproco de la concentración, $C_{1/2}$, en el cual el adsorbente esta medio

saturado con el adsorbato. Si la concentración C , esta escalada en la unidad de $C_{1/2}$, y reemplazada la C' , donde $C' = C/C_{1/2}$, se obtiene la ecuación universal adimensional de Langmuir, $\theta = C'/(1+C')$. Puntos escogidos arbitrariamente sobre segmentos de la gráfica normal de Langmuir se pueden ajustar a diferentes ecuaciones de Freundlich con significancia estadística. Esto indica que la ecuación de Freundlich es aplicada para representar un rango selecto de los datos de adsorción que también se ajustan a la ecuación de Langmuir.

Los mismos autores señalan además que los métodos de cuadrados más pequeños lineales y no-lineales se aplicaron en tres suelos de Taiwán, para ajustar los datos experimentales de adsorción de un ión metálico en la presencia de otro ión metálico, para las ecuaciones de Langmuir y Freundlich. La bondad del ajuste del modelo para los datos experimentales se comparó con la magnitud de la raíz residual del cuadrado medio del error (RMSE) de la forma original no-lineal de ambas isothermas de adsorción.

Houng y Lee (1998), señalan que los resultados indican que las conclusiones simples, basadas en los valores obtenidos de R^2 por el método lineal usual de cuadrados mas pequeños o de cuadrados menores aplicado para las ecuaciones linealmente transformadas, están en un error. Siempre y cuando la adsorción del ión metálico sobre los suelos es mejor representada por la ecuación de Freundlich, considerando desde el tamaño del valor de R^2 , que para la ecuación de Langmuir, hay casos en los cuales la ecuación de

Langmuir representa mejor los datos experimentales basados en el tamaño del valor de (RMSE). Estos son ejemplos de experimentos conducidos en un rango limitado de concentraciones. Al incrementarse el rango de concentración para los experimentos de adsorción se pueden eventualmente tornarse las isothermas de adsorción tipo Freundlich en las de tipo Langmuir si no surgen complicaciones en las soluciones mas concentradas. Finalmente, los mismos autores establecen que es notorio que incluso los datos puntos que ajustan exactamente la ecuación de Langmuir se pueden ajustar a la ecuación de Freundlich en un nivel de significancia estadísticamente, y actualmente es posible que un grupo de datos que parecen ajustar mejor la ecuación de Freundlich vienen desde una Isotherma de Langmuir. Este problema es considerado, junto con la aplicación de los cuadrados lineales menores (LLS) y (NLLS).

Thibaud, *et al.*, 1996. indican que en el estudio de modelación matemática de la adsorción y desorción de los contaminantes volátiles del suelo, la forma de la isoterma influencia los perfiles de adsorción y desorción. De acuerdo a los autores se encontró que un modelo matemático se presenta para la predicción de los perfiles de la adsorción y de la desorción de contaminantes orgánicos volátiles del suelo secados en el horno en una columna. El modelo asume equilibrio local entre la fase del gas del poro y la fase sólida en el suelo, el patrón del flujo axialmente dispersado en la columna, y las resistencias de la transferencia de masas en la partícula y en la película alrededor de la partícula. Los datos son tomados sobre la adsorción/desorción

de los compuestos orgánicos volátiles usando el análisis de la cromatografía frontal y los avances son predichos por el modelo sin el uso de datos de parámetros ajustados. Se observó que los perfiles del avance de la desorción exhiben una sección de meseta si las cargas iniciales del suelo de los compuestos orgánicos volátiles exceden cierto límite. Estos perfiles no se pueden predecir por el modelo usando la isoterma de la adsorción para el compuesto orgánico volátil en suelo. La meseta que se obtiene en los perfiles de la desorción es vinculada a la existencia de los fenómenos de una histéresis de la desorción, que está presente incluso en los cargas cerca de la cantidad correspondiente a la cobertura de la mono-capa que es así conocida como la "curva de la exploración". La histéresis de la desorción se determina experimentalmente, y su efecto se comprueba cuando se comparan las curvas de desorción obtenidas seguido de la derivación de las isotermas de adsorción y desorción.

Wen, *et al.*, 1996, indican que se estudió la adsorción de N, N-dimetilformamida (DMF), incluido como uno de los agentes contaminadores del aire o tóxicos del aire, sobre dos adsorbentes granulares comerciales, siendo estos, carbón activado (cáscara del coco) y la zeolita hidrofóbica. La investigación se condujo a las temperaturas de 293, 303 y 313°K en el laboratorio. Las propiedades físicas y la caracterización de los dos adsorbentes se midieron y compararon en su caso. Los resultados experimentales indican que la capacidad de la adsorción del carbón activado es significativamente más alta que la de la zeolita. Los autores indican que los datos medidos de la adsorción

son razonablemente bien descritos por las ecuaciones de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich. Los valores de los parámetros de las ecuaciones de adsorción se obtuvieron para los dos adsorbentes. Además se determinó la capacidad de adsorción del vapor en los dos adsorbentes examinados, principalmente a través de las propiedades físicas de los adsorbentes (el área superficial BET y el volumen del microporo), las cuales son consistentes con los parámetros de la isoterma que se obtuvo de los resultados experimentales.

Yli, *et al.*, 1995. señalan que para cuantificar los factores físicos y químicos que controlan el nivel de P soluble en las suspensiones del suelo y los experimentos se condujeron en el laboratorio. Los autores indican que el objetivo de este estudio fue identificar las variables necesarias en los modelos simulando la carga de disolución del reactivo P (DRP) en la superficie erosionada de la tierra cultivada. Además, se investigó con muestras de suelo colectadas de dos campos experimentales la liberación del P del suelo como una función de la relación agua a suelo y la fuerza iónica. La relación dinámica entre el suelo y la solución de P se estudió por las isothermas de adsorción y desorción. Se comparó el resultado de las pruebas de laboratorio con la media de concentración del flujo del (DRP) en el agua de escurrimiento de los campos experimentales en el suroeste de Finlandia. Se encontró que la concentración de (DRP) es también alta por haber sido originado únicamente del material transportado del suelo erosionado por la corriente. Se calculó que el (DRP) se presentó principalmente por la desorción de P de la superficie del suelo durante

una lluvia o un periodo de deshielo de la nieve. La concentración media de (DRP) indicó ser controlada por el estatus del P de la superficie del suelo. La concentración de (DRP) de los extractos del suelo que se obtuvo en las relaciones agua a suelo de 250-100 L•kg⁻¹ (rango de concentración del suelo de 4-10 g•L⁻¹) corresponde a la concentración media de (DRP) del flujo de la superficie de agua corriente y puede ser usada para cuantificar la remoción de (DRP) por la corriente superficial. Las variaciones en la fuerza iónica y la relación agua a suelo en la superficie del suelo controla la variación temporal del (DRP) en el agua corriente. Los autores concluyen que en estos suelos, unas series de extracciones de agua en diferentes relaciones de agua a suelo, es un procedimiento más confiable en calcular la carga de P potencial que los parámetros derivados de las isothermas de adsorción-desorción.

Cuantificación de la Desorción de Fósforo

Amer *et al*, (1955) establecen el uso de las resinas de intercambio aniónico en la cuantificación del P adsorbido en la resina Dowex-2. Se determinó que la resina adsorbió pequeñas cantidades de P de soluciones cuantitativas, así como la velocidad de adsorción de P por la resina agitada en solución es proporcional a la cantidad de P en solución y es independiente de la velocidad de difusión de P adsorbido en la resina. De acuerdo a la metodología empleada en este estudio se observó que cuando 1 g de suelo se agitó continuamente con 1 g de resina en 100 ml de agua, la velocidad de adsorción de P por la resina es controlada por la velocidad de liberación del P del suelo.

Además se encontró que en un grupo de 16 suelos, la correlación entre el P adsorbido por la resina en 2 horas y la disponibilidad de P para las plantas en el invernadero es de 0.95, medida por el método de dilución isotópica de Fried y Dean.

Elrashidi, *et al.*, (1975) señalan que la técnica de la resina de intercambio aniónico se aplicó a diez suelos de la costa norte-oeste de Egipto y se usó la resina de intercambio aniónico Merck III. Con el uso de esta técnica la caracterización de la capacidad de P y la velocidad de liberación de P se hizo posible. Además, el método permitió la identificación de las formas nativas del P del suelo responsable de suplementar a las plantas con el elemento. Los autores indican que los datos muestran una alta correlación significativa entre el P extractado por la resina en cada uno de los períodos de equilibrio empleados y la absorción de P con las plantas de cebada. En las pruebas de los suelos altamente calcáreos el período muy corto de equilibrio de una hora es sugerido para determinar la disponibilidad de P.

Massee, *et al.*, (1977) explican que en dos suelos se efectuó la medición del flujo de difusión de iones del suelo hacia una resina de intercambio iónico y se utilizó unas bolsas que contenían resina, una con un suelo no tratado y la otra con el mismo suelo fertilizado con P, K y Cl. El fósforo, el potasio y el cloro que se difunde a la resina de cada bolsa se extrajo y determinó. Se determinó la correlación que existe entre los valores calculados de las pruebas de laboratorio y las mediciones químicas cuantitativas

tradicionales. En general, la adsorción de P y K se correlacionó bien con las mediciones del flujo difusivo y también con las mediciones químicas tradicionales.

Sibbesen, (1977) explica que comparó un procedimiento simplificado para extraer iones del suelo con resinas de intercambio iónico y un procedimiento convencional, donde la resina goteo y estaba libremente suspendida en la mezcla de suelo-agua, este procedimiento de la bolsa permitió la separación rápidamente de la resina de las suspensiones del suelo. El procedimiento de la bolsa generó valores ligeramente superiores al procedimiento convencional.

Sibbesen, (1978) indica que investigó el método de la resina de intercambio aniónico para la extracción del P en cuatro suelos diferentes bajo condiciones experimentales variables, tales como el tipo de resina de intercambio aniónico, la forma del anión de la resina, la relación entre la cantidad de resina, suelo y agua, y el tiempo de agitación. La cantidad de P extractado es dependiente de la forma iónica de la resina. Para ambas formas de resinas en el cloruro la cantidad de P extractado por unidad de suelo y el pH de la suspensión vario con el tipo de resina y la relación agua-suelo. Las formas de resina en el bicarbonato estabilizan el sistema, así que la cantidad de P extractado y el pH de la suspensión es siempre independiente del tipo de resina y la relación agua-suelo. Los resultados indican que la desorción del P desde la fase sólida a la fase hídrica es el paso que determina la velocidad en el proceso

total de transportar el P desde la fase sólida a través de la fase hídrica a la fase de resina y que la resina este en exceso de preferencia. Finalmente, los autores indican que la velocidad de desorción de P es dependiente de la composición química de la fase hídrica, la cual en su momento es gobernada por el tipo de suelo, la relación agua-suelo, el tiempo de agitación y la forma iónica de la resina.

Abrams y Jarrell, (1992) explican que se investigó el uso de membranas impregnadas de resina de intercambio iónico como una medida del potencial de bio-disponibilidad de los nutrimentos. Se propuso que las membranas demandantes del ión (IS) pueden integrar la concentración nutritiva del suelo y aunado a efectivas velocidades de difusión del nutriente dan por resultado una mas completa medición de la bio-disponibilidad del nutriente. Las membranas (IS) son aplicadas al suelo directamente y recubiertas después de fijar intervalos de tiempo. La velocidad en los cuales los iones son adsorbidos por la membrana (IS) es directamente relacionado a (c^2D_e) , donde la concentración de P lábil es c y (D_e) es el coeficiente de difusión efectiva. Donde este valor es el índice de bio-disponibilidad (IS) de un nutriente dado. El índice ofrece una medida integrada de la difusión de un ión, de las velocidades de adsorción y desorción, y la concentración de la solución. El índice de bio-disponibilidad se correlaciona con la absorción del nutriente por la planta. Los autores indican que el (IS) para el P y el Fe se correlacionó bien con el P extractado por (AB-DTPA) bicarbonato de amonio-ácido dietilentriamina penta-acético en suelos saturados a través de un rango de concentraciones de Fe y P del suelo. En

adición, la absorción de P por la planta bajo condiciones saturadas se correlaciono con el (IS) a través de un rango de concentraciones de P.

Raven y Hossner, (1993) señalan que se desarrolló una investigación para evaluar las características de la desorción de P en cinco suelos con características muy diversas de Texas, EUA, al mismo tiempo se comparó varios modelos empíricos para describir las curvas de desorción Q/I. Estos investigadores indican que la capacidad de liberación de P de los suelos en estudio es relativamente baja. La concentración de la solución de P cuando el P no es desorbido (I_0), un parámetro intensidad, fluctuó entre < 0.01 y $0.19 \text{ mg P} \cdot \text{L}^{-1}$ y la máxima desorción de P del suelo (Q_{max}), un parámetro cantidad, estuvo en un rango de 4.7 a $21.1 \text{ mg P kg}^{-1}$. El índice del poder buffer del P, la pendiente de la curva Q/I en (I_0), fluctuó entre 56 y $1703 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$. Estos parámetros no tuvieron estrecha relación a alguna propiedad del suelo que se evaluó con la excepción del contenido de CaCO_3 en suelos calcáreos y el contenido de arcilla. Se estableció que las curvas de desorción son descritas por una ecuación de desorción Q/I : $Q = a \cdot I^{-0.1} + b \cdot \ln(I+1) + c$ y la función potencial de Barrow, pero la ecuación propuesta siguió la tendencia teórica esperada, por lo que se considera adecuada para describir las curvas de desorción de P (Q/I).

Raven y Hossner, (1994) indican que se comparó los parámetros de adsorción y de desorción, y los índices de disponibilidad de P del suelo en cinco suelos de Texas, EUA. En un experimento de invernadero se relacionó los

datos de adsorción y de desorción de P a el crecimiento del maíz y a los resultados de absorción de P. Los factores Intensidad y Capacidad derivados de las curvas de adsorción y desorción Q/I no son buenos indicadores de la capacidad de suplementar P del suelo, pero la máxima desorción de P del suelo (Q_{max}) se relacionó mejor al crecimiento de la planta y a la absorción de P. Los autores concluyen que estos resultados indican que un parámetro cuantitativo específico que se obtiene de las relaciones de desorción de P (Q/I) es más útil y significativo que cualquier parámetro que se obtiene de las curvas de adsorción de P, cuando se evalúa en el suelo la disponibilidad de P para la planta.

Raven y Hossner, (1994) explican que se efectuó un estudio para describir la cinética de desorción de P de los suelos y relacionar la información derivada de las curvas cinéticas al crecimiento de la planta y a la absorción de P. Se comparó la capacidad de varias ecuaciones. Se produjeron, por equilibrio de suspensiones de las muestras de suelo incubadas con bolsas de malla conteniendo HCO_3^{-1} saturado con resina de intercambio anionico por períodos superiores a las 96 horas, los datos de la cinética de desorción de P para cada tratamiento. La forma ampliada de la ecuación de Elovich describe mejor los datos cinéticos. Las cantidades inicial y final de P desorbido se relacionó estrechamente al crecimiento relativo de la planta y a la absorción del P. La desorción final de p del suelo es el mejor índice de disponibilidad de P del suelo. La desorción de P del suelo, en general, tiene una relación específica entre el suelo con el crecimiento de la planta de maíz y la absorción de P y no parece limitar la nutrición de P de las plantas.

Steffens, (1994) trabajó con 15 Alfisoles de Europa e investigó la cinética de la liberación de P del suelo por el método de electroultrafiltración (EUF). Encontró que la cinética de liberación de P por EUF se describe mejor por la ecuación de Elovich que por otras funciones de difusión. Los valores de Elovich (b), los cuales son usados como un índice de velocidad de liberación, fluctuaron desde 53.3 a 140 mg de P/kg suelo/min. Los valores de (b) se correlacionaron más estrechamente a la absorción de P acumulado por la planta ($r = 0.96$) que aquel P extractado con agua ($r = 0.90$), acetato de calcio-lactato y acetato de calcio-ácido acético(CAL) ($r = 0.89$), reactivo de Mehlich 3 ($r = 0.81$) y doble lactato ($r = 0.79$). En los 15 suelos, con la ecuación ajustada: $y = 27.8 + (0.40 \text{ CAL P}) + (0.83b)$; con un $r = 0.99$, la absorción de P acumulado por la planta se predice adecuadamente, (y) denota la absorción de P por la planta, CAL P es el P adsorbido y el valor de Elovich (b) (mg P/kg suelo/min). El autor indica que es una mejor estimación de la absorción de P considerar el valor de (b) como un parámetro de liberación de P y la cantidad de P extractable (CAL) para determinar la disponibilidad de P siguiendo diferentes aplicaciones, que considerar solamente un índice de disponibilidad de fósforo.

Cooperband y Logan, (1994) señalan que se calibraron varias metodologías para membranas impregnadas de resinas de intercambio aniónico, liberación de P de las membranas a la solución de un suelo con alta capacidad de fijación de P y se evaluó la variabilidad de los métodos bajo condiciones de campo en el trópico húmedo. Se usaron las membranas de I-A en un estudio para evaluar las características de la descomposición de los

residuos de las plantas y la liberación del P del estiércol y los flujos concurrentes en P lábil del suelo. La capacidad de adsorción de P de las membranas no se alteró significativamente por el uso repetido de las mismas. Las concentraciones de nitrato en solución de 50 y 100 mg de $\text{NO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ reduce la adsorción de P por las membranas en un 50 y 75 por ciento, respectivamente, a pesar de toda la concentración de P en solución; la presencia de SO_4^{-2} en 500 y 1000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ reduce la adsorción de P por las membranas en un 98 por ciento, aproximadamente. En el contexto de un pH bajo y suelos con alta retención de P, se concluyó que las membranas de I-A se comportaron más que infinitos demandantes de P como intercambiadores dinámicos.

Agbenin y Tiesen, (1995) indican que se investigó en cinco suelos de la parte semiárida del noreste de Brasil el tiempo dependiente de la adsorción y la transformación de P, con la ayuda de los modelos cinéticos y extracción secuencial. Se encontró que el tiempo dependiente de la adsorción de P fue descrita por los modelos cinéticos en el orden siguiente: ecuación de Elovich igual que = modelo función fraccional de potencia > modelo aparente de primer orden > modelo de difusión parabólica, los cuales son indicativos de la cinética de difusión con una reacción química lenta. Los autores señalan que la extracción secuencial de P por el procedimiento modificado de Hedley indicó que del 60 al 90 por ciento del P adsorbido estuvo en la forma lábil. Se concluye que la ecuación simplificada de Elovich estima adecuadamente la cantidad de P inmovilizado por coloides inorgánicos y orgánicos durante un séptimo período.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pruebas de Laboratorio

Selección de los Sitios de Estudio

Previamente se realizó una identificación de los sitios del estudio, con el apoyo de cartas del suelo en diferentes escalas, considerando diferentes factores para la selección, se procedió a continuación a establecer contacto con los propietarios de los ranchos seleccionados y solicitar su autorización para llevar a cabo la investigación. Los suelos que se utilizaron en esta investigación se encuentran dentro de las principales zonas agrícolas, ubicadas dentro del área de influencia de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, y corresponden a los ranchos "El Bayonero" y "El Venado", de los municipios de Arteaga y Parras de la Fuente, Coahuila, respectivamente, así como "El Erial" de San Rafael, y "El Potrero" de Navidad, Nuevo León. Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Ubicación geográfica de los sitios en estudio y su altitud en m.s.n.m.

Características	El Bayonero	El Venado	El Potrero	El Erial
Latitud Norte	25° 15' 41"	25° 27' 15"	25° 4' 15"	25° 2' 15"
Longitud oeste	100° 47' 57"	101° 57' 25"	100° 36' 30"	100° 33' 00"
Altitud aproximada	1960 msnm	1650 msnm	1895 msnm	1900 msnm

Descripción de los Sitios Experimentales.

Rancho el Bayonero, Arteaga, Coahuila.

Este rancho esta ubicado en el kilómetro 215 sobre la carretera federal No. 57, tramo Matehuala San Luis Potosí-Salttillo Coahuila, con las coordenadas 25° 15' 41" de latitud Norte y 100° 47' 57" de longitud oeste, con una altitud aproximada de 1960 msnm.

El clima. El rancho el Bayonero se localiza en una región cuyo clima es Bs₁ Kw (x') (e') según la clasificación de Köppen modificada por García que lo define como clima semiseco, templado con verano cálido muy extremo, teniendo una temperatura media anual entre 12.7 °C y la temperatura media del mes más frío oscila entre -3 y 18 °C. Los meses más fríos son diciembre, enero, febrero y marzo, presentándose hasta 74 heladas al año en promedio, las lluvias más abundantes son en julio y agosto alcanzando una precipitación promedio anual de 470.6 mm.

El suelo. El rancho el Bayonero se ubica en una región cuyo suelo se clasifica Castañosem aplico. Son suelos con una profundidad superior al 2 por ciento en los primeros 30 cm de profundidad, con una precipitación pluvial mayor a 350 mm, de acuerdo a tales características y según la séptima aproximación (sistema americano) dentro del orden molisol, suborden ustolls y gran grupo argiustolls.

Rancho el Venado, Parras de la Fuente, Coahuila

El clima. El rancho el Venado, se localiza geográficamente en las coordenadas 25° 27' 15" latitud norte y 101° 57' 25" longitud oeste, con 1650 msnm, presentando un clima cálido seco.

El suelo. En esta región se clasifica como Xerosol aplico con denominación (xn/2a), el contenido de materia orgánica es moderado, muy permeables con textura media, aceptable capacidad de intercambio cationico, sin problemas de drenaje, con una orografía de terreno plano y ligeramente ondulado con pendientes menores de 8 por ciento. Cuenta con terrenos aptos para la agricultura por lo regular por temporal permanente anual, con fertilización y mejoradores del suelo son capaces de ofrecer buenas cosechas.

Rancho el Potrero, Navidad, Nuevo León

Se localiza en el ejido Navidad, Nuevo león, geográficamente se encuentra entre las coordenadas 25° 04' 15" latitud norte y 100° 36' 30" longitud oeste del meridiano de Greenwich a 1895 msnm.

El clima. Según la clasificación de Köppen modificada por García, lo define como Bs₁Kw (e') y se describe como semiseco, templado muy extremo, con lluvias en verano siendo julio y agosto los meses más lluviosos. La temperatura media anual es de 14.3 °C con máximas extremas de 40.0 °C

en septiembre y mínimas de $-15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el mes de enero. La precipitación media anual es de 516.2 mm, distribuidos principalmente entre los meses de abril a octubre donde ocurre el 78.7 por ciento de la total anual. El periodo libre de heladas es de abril a septiembre, aunque ocasionalmente se presentan también en estos meses. La evapotranspiración media anual es de 1116.7 mm, siendo agosto el mes con mayor evaporación.

El suelo. Por su origen en este lugar pertenecen a la era mesozoica del periodo cuaternario, cretácico inferior y el gerasico, se caracterizan por ser suelos de textura migajon limoso, de color crema rosado muy claros. Se les localiza en llanos intermontanos o en extensas llanuras. Son de origen aluvial o coluvial - aluvial. Se clasifican como Xerosoles, presentan bajos contenidos de materia orgánica, estructura en bloques medios a gruesos. Estos suelos sustentan una vegetación natural de pastizal halofito. El suelo se considera adecuado para la práctica de agricultura. En cuanto a fertilidad, son suelos medianamente rico en nitrógeno y materia orgánica suficiente en potasio y pobre de fósforo.

Rancho el Erial, Galeana, Nuevo León

El rancho el Erial se localiza en las coordenadas $25^{\circ} 2' 15''$ latitud norte y $100^{\circ} 33'$ latitud oeste del Meridiano de Greenwich a 1900 msnm.

El clima. En esta región durante el invierno es templado semiárido el cual consta de una temperatura media de 16.2 °C y una precipitación de 100 a 200 mm. Mientras que en el verano el clima es semiárido con una temperatura media de 18 a 20 °C y una precipitación de 300 mm.

El suelo. Se clasifica como Eutrico calcárico ligeramente salino y de textura media a muy ligera, aceptable capacidad de intercambio cationico, y bajo contenido de material arcilloso.

La Vegetación en los Sitios de Estudio

La vegetación en los sitios de estudio en condiciones naturales esta constituida por matorrales bajos, inermes y espinosos, matorrales rosetofilos y matorrales crasicaules, este tipo de vegetación presenta características xeromórficas. Existe una amplia variedad de especies vegetales formada por mezquites (*prosopis sp*), huizaches (*Acacia sp*), Gobernadora (*Larrea tridentata*) y hojansen (*Flaureáis cernua*) pastos de los géneros Boutelova y sporobulos, ocotillo, albarda, maguey, manso, Lechuguilla (*agave lechuguilla*), gatoño(*Acacia romeriana*), guayule(*parthenium argentatum*) palma samandoca (*Yuca carerosa*), candelilla (*Euphobia antisiphylitica*), calabasilla blanca, sotol, (*Dacylirion spp*) y nopal mimbre, palo blanco, fresno, pino, cedro y cactáceas de diferentes variedades.

Análisis Físicos y Químicos del Suelo

Los análisis físicos y químicos del suelo se llevaron a cabo en los laboratorios del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. A los suelos en estudio se les practicó un análisis para determinar sus propiedades físicas y químicas, siendo estas: La clase textural, densidad aparente, elementos mayores (nitrógeno total, el fósforo disponible, el potasio), la capacidad de intercambio cationico, materia orgánica, el pH del suelo, contenido de carbonatos totales, el análisis total de salinidad del suelo que contempló la determinación de la conductividad eléctrica, calcio, calcio + magnesio, carbonatos solubles, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, además de realizar en estos suelos las pruebas de adsorción y desorción de fósforo, en el Cuadro 3.2 se muestran los diferentes métodos empleados en estas determinaciones.

Preparación de las Muestras de Suelo

Para la preparación de las muestras enriquecidas con fósforo se procedió de la siguiente manera: se tamizó el suelo con una malla de 2 mm, se tomaron 50 g de cada suelo y se colocaron en recipientes de plástico con tapa, en cada suelo por duplicado se aplicó una solución de fósforo. Las concentraciones de: 0, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, mg de fósforo por kg de suelo. La fuente de fósforo fue una solución de fosfato monobásico de potasio ($\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) que se aplicó a la superficie del

suelo, las muestras se mezclaron cuidadosamente y a continuación se incubaron a capacidad de campo a una temperatura de 25 °C por 31 días. Posteriormente las muestras se secaron al aire a la temperatura ambiente, se molieron para destruir los terrones y dejarlas en condiciones para realizar las pruebas de adsorción. Se determino el fósforo hidrosoluble por el método modificado de Van der Paauw. Después se determino el fósforo extractable por los métodos de Olsen y el de Fox y Kamprath.

Cuadro 3.2. Métodos empleados en los análisis de los suelos en estudio.

Características	Unidades	Método empleado
Nitrógeno total	%	Kjeldahl
Fósforo aprovechable	mg kg ⁻¹	Olsen
Potasio intercambiable	%	Cobaltinitrito de sodio
Capacidad de intercambio catiónico	meq 100g ⁻¹	Acetato de amonio
Materia orgánica	%	Walkley y Black
pH del suelo	2:1	Potenciómetro
Carbonatos totales	%	Volumétrico
Extracto de salinidad		
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	Puente de Wheatstone
Calcio	meq L ⁻¹	Volumétrico
Magnesio	meq L ⁻¹	Volumétrico
Carbonatos solubles	meq L ⁻¹	Volumétrico
Bicarbonatos	meq L ⁻¹	Volumétrico
Cloruros	meq L ⁻¹	Volumétrico
Sulfatos	meq L ⁻¹	Gravimétrico
Densidad aparente	g/cm ³	Probeta
Textura	%	Hidrómetro de Boyoucos

Metodología para la Cuantificación de Fósforo

Medición de Fósforo Hidrosoluble (Método de Van der Paauw)

En 5 gramos de suelo se agregan 50 cm³ de agua destilada, se agitan por 48 horas continuas. Después de este tiempo se filtra, usando un filtro que no absorba ni libere fosfatos. Se toma una alícuota de 10 cm³ del filtrado, para determinar por colorimetría el P en solución o remanente usando el método de reducción con ácido ascórbico de Watanabe y Olsen (1965).

Medición de Fósforo Extractable (Método de Fox y Kamprath)

Cinco gramos de suelo seco se ponen por 6 días con 30 cm³ de solución extractora de CaCl₂ 0.01M y se agitan un período de 30 minutos dos veces al día. La suspensión se filtra y se toma una alícuota de 10 cm³ para determinar por colorimetría el P en solución por el método de reducción con ácido ascórbico de Watanabe y Olsen (1965).

Experimento de Invernadero

Preparación de Macetas

Para los estudios de invernadero se tomaron de cada sitio suficiente suelo el cual se traslado en costales de 50 kg, se extendió y secó al aire,

posteriormente se utilizó una malla de 0.5 cm para tamizarlo. Se procedió a tratar el suelo con bromuro de etilo para eliminar la presencia de diversos patógenos y evitar la aparición de enfermedades en las plantas, a continuación se procedió a llenar las macetas de plástico con cinco kg de suelo.

Tratamiento de los Tubérculos

Con el propósito de evitar la aparición de enfermedades en los tubérculos, se preparó una solución con diferentes agroquímicos como Tecto 60, Agromyquo, y Qufuran. Los tubérculos se sumergieron completamente durante algunos minutos en un recipiente y posteriormente se dejó secar al aire.

(Cuadro 3.3.)

Cuadro 3.3. Agroquímicos empleados en el tratamiento de los tubérculos con sus respectivas dosis.

Agroquímicos empleados	Dosis
Agromyquo	1 g por litro de agua
Tecto 60	1 g por litro de agua
Qufuran	4 ml por litro de agua

Siembra

El experimento se estableció el 12 de febrero de 1998, el contenido de cada maceta fue de 5 kg de suelo y los tubérculos de papa sembrados a una

profundidad de 5 cm de la superficie del suelo. Se utilizó la variedad "Alpha". Las macetas se arreglaron en el invernadero bajo un diseño completamente al azar para cada suelo en estudio.

Después de la emergencia de las plantas, se procedió a la aplicación de los tratamientos a través de soluciones de ácido fosfórico (H_3PO_4). Las concentraciones empleadas en el estudio son 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150 mg de fósforo por kg de suelo, como se aprecia en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4.. Tratamientos en estudio y sus concentraciones de fósforo.

Tratamiento	Concentración mg de P kg^{-1}
1	0
2	25
3	50
4	75
5	100
6	125
7	150

En adición otros nutrimentos se añadieron a razón de: N, K y S 100 mg kg^{-1} , Ca 60 mg kg^{-1} , Mg 40 mg kg^{-1} , un cm^3 de solución Hoagland's en un litro de agua y por maceta formada por H_3BO_3 2.86 $g \cdot l^{-1}$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 1.81 $g \cdot l^{-1}$, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.22 $g \cdot l^{-1}$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.08 $g \cdot l^{-1}$, $H_2MnO_4 \cdot H_2O$ 0.02 $g \cdot l^{-1}$ y solución de fierro 0.08 g de Na-EDTA + 3 ml de $FeCl_3$ al 10 por ciento y se afora a 360 cm^3 , de esta solución madre, se agregan 10 cm^3 por litro y a la vez se

aplica a una maceta. Las soluciones aplicadas se distribuyeron alrededor del tubérculo y se cuidó que no causaran daño físico al tubérculo.

Cuadro 3.5. Nutrimientos utilizados en el experimento.

Nutrimientos	Concentración
N	100 mg· kg ⁻¹
K	100 mg· kg ⁻¹
S	100 mg· kg ⁻¹
Ca	60 mg· kg ⁻¹
Mg	40 mg· kg ⁻¹

Cuadro 3.6. Solución Hogland's utilizada en el experimento de invernadero

Nutrimientos	Concentración
H ₃ BO ₃	2.86 g·L ⁻¹ de agua
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81 g·L ⁻¹ de agua
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22 g·L ⁻¹ de agua
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08 g·L ⁻¹ de agua
H ₂ MnO ₄ ·H ₂ O	0.02 g·L ⁻¹ de agua
Solución de fierro(solución madre)	se agregan 10 cm ³ por litro
Na-EDTA **	0.08 g
FeCl ₃ **	3 ml al 10 %

** Se aforan juntas a 360 cm³

Labores de Cultivo

Riegos

En función de los niveles de abatimiento de humedad los riegos se aplicaron y se procuró mantener a capacidad de campo los suelos en estudio, para tal actividad se utilizó una regadera, aplicando riegos ligeros cada tercer día por lo regular o en su defecto diariamente.

Control de Malezas

Debido al tratamiento previo de fumigación del suelo la maleza solo se presentó en forma esporádica y con escaso desarrollo vegetativo. Sin embargo, durante el desarrollo del cultivo de papa, el control de malezas se llevó a cabo manualmente, a través del uso de la herramienta correspondiente.

Plagas y Enfermedades

En el desarrollo del cultivo no se presentó daño por plagas y enfermedades, ya que de manera preventiva se aplicó Confidor para evitar la aparición de la mosquita blanca (*Trialeurodes*); Tecto 60, Agromyqu y Qufuran para enfermedades causadas por hongos y bacterias. Estos productos se aplicaron manualmente haciendo uso de mochilas aspersoras con las dosis indicadas en las etiquetas de los productos químicos (Cuadro 3.3.).

Variables Evaluadas

Las variables a evaluar se realizaron a los 90 días después de la siembra.

Altura de Planta

La medición de esta variable se realizó por medio de una cinta métrica desde la superficie del suelo hasta el brote apical de cada tallo principal de la planta, de esta manera se obtiene una media de la altura para las plantas en cada maceta.

Número de Tallos por Planta

Para esta variable se contabilizaron los tallos de las plantas por maceta y se obtuvo una media para cada maceta y repetición.

Número de Pecíolos Promedio por Planta

En esta variable se contabilizó el número de pecíolos por cada una de las planta que se encontró en cada maceta, a continuación se calculó un promedio por tratamiento y repetición.

Peso Seco de Planta

Para cuantificar esta variable se cortaron las plantas al nivel de la superficie del suelo con una navaja eliminando las raíces y los tubérculos, quedando solamente la parte aérea de la planta. A continuación las plantas se introducen en bolsas de papel perforadas y se depositan dentro de una estufa a una temperatura de 70 °C por un tiempo de 72 horas, posteriormente se sacan y se pesan en una balanza analítica, para registrarse el peso total de la planta en seco.

Número de Tubérculos

En esta variable se contabilizó el número total de tubérculos por cada unidad experimental o maceta.

Peso Promedio de Tubérculos

Esta variable se cuantificó el peso total de los tubérculos que se tienen por unidad experimental y después se divide por el número de tubérculos.

Peso Total de Tubérculos

Para cuantificar esta variable se pesó el total de los tubérculos que se cosecharon en cada una de las macetas o unidades experimentales.

Diámetro Polar y Ecuatorial

Estas dos variables se cuantificaron en cada uno de los tubérculos cosechados por unidad experimental, utilizándose un Vernier para el caso a continuación se obtiene una media de estos valores.

Diseño Experimental

En el experimento de invernadero se utilizó un diseño experimental completamente al azar con siete tratamientos y cuatro repeticiones, para tener de esta manera 28 unidades experimentales en cada uno de los suelo en estudio.

Modelo Estadístico

El modelo estadístico que se utilizó en el experimento de invernadero se ajusta a la ecuación siguiente.

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

- i = 1, 2, 3, ..., t tratamientos.
- j = 1, 2, 3, ..., r repeticiones.
- $\varepsilon_{ij} \approx NI(0, \sigma^2)$

- Y_{ij} = Respuesta del tratamiento i-ésimo en su repetición j-ésima
- μ = Media general común a cada una de las unidades experimentales
- T_i = Efecto del i-ésimo tratamiento
- ε_{ij} = Error experimental a la cual se le asume distribución normal e independencia con media cero y varianza constante σ^2

Experimento de Campo

Preparación del Suelo para el Experimento

El experimento de campo se desarrolló en el ciclo agrícola primavera-verano 1998 en el rancho el Bayonero del municipio de Arteaga, Coahuila. En el suelo del área experimental se efectuó un barbecho y rastra en forma cruzada a 30 cm de profundidad. Se aplicó un riego para inducir el crecimiento de malas hierbas y se procedió a la aplicación de herbicida. Finalmente, se aplicó un rasteo para obtener una retención de humedad y aireación óptima, para lograr así condiciones favorables para una excelente germinación.

Fertilización del suelo

Previo a la siembra se llevó a cabo la fertilización del experimento a través de una mezcla de fertilizantes, la cual fue preparada exclusivamente para el estudio. La mezcla incluía todos los ingredientes de la fórmula comercial del productor con la excepción de fósforo. Esta mezcla se preparó a base de sulfato de amonio, sulfato de potasio, elementos menores, micronutrientes, estiércol y gallinaza, sin especificar el productor y el fabricante las cantidades de cada componente de la fórmula.

Siembra

La siembra se efectuó el 21 de mayo de 1998. En forma manual se depositó la semilla en el fondo del surco donde previamente se había depositado la mezcla de fertilizantes los cuales se cubrieron con una capa de 3 a 5 cm de suelo. La distancia entre tubérculos fue de 20 cm y entre surcos de 92 cm, para obtener una densidad de siembra superior a las 54,000 plantas por hectárea. Una vez depositados los tubérculos en los surcos y con el propósito de proteger la semilla en la etapa de brotación y evitar aparición de enfermedades prematuras, se procedió a cubrirlos con una asperción de una mezcla de insecticidas, nematicidas y fungicidas, descritas en el Cuadro 3.7. A continuación se taparon los tubérculos con una arado de doble vertedera, quedando cubiertos con una capa ligera de 5 a 8 cm de suelo.

Cuadro 3.7. Productos químicos aplicados, dosis y acción que ejercen en la protección de los tubérculos

Producto químico	Acción	Dosis
Monceren	Nematicida	7.0 kg/ha
Rexlal	Antibacterial	5.0 kg/ha
Benlate	Funguicida	2.0 kg/ha
Acido cítrico	Antibacterial	400 g/ha

Acomodo de la Cintilla

Una vez que los tubérculos se encontraban cubiertos en forma parcial, se procedió a acomodar en forma manual la cintilla plástica (calibre 8000) en el lomo del surco, procurando que a futuro ésta no estorbara el desarrollo normal de la planta, finalmente se tapó totalmente la cintilla, quedando el tubérculo a una profundidad aproximada de 12 cm de la superficie.

Descripción de los Tratamientos

En el experimento de campo se estudió el fósforo como único factor y nutrimento en la producción del cultivo de papa en condiciones de campo, los tratamientos que se probaron son exactamente los mismos que se estudiaron en el experimento de invernadero y que correspondieron a los niveles más bajos de las pruebas de laboratorio, siendo estos 0, 25, 50, 75, 100, 125 y 150 mg de P kg⁻¹ de suelo. Los tratamientos y sus equivalentes en kg de fósforo por hectárea y kg de P₂O₅ por hectárea se presentan en los Cuadro 3.8. y 3.9.

La transformación de los tratamientos expresados en partes por millón (ppm) a valores expresados en kilogramos de fósforo por hectárea (kg P·ha⁻¹) para el Rancho el Bayonero se explica en el apéndice.

Cuadro 3.8. Tratamientos en estudio y sus equivalencias en kg P ha⁻¹ y kg de P₂O₅ por hectárea.

No. de Tratamiento	Tratamiento	kg P·ha ⁻¹	kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹
1	0	0	0
2	25	80.197	183.7621
3	50	160.395	367.5243
4	75	240.592	551.2864
5	100	320.790	735.0486
6	125	400.987	918.8096
7	150	481.185	1102.5728

Cuadro 3.9. Descripción de los tratamientos expresados en diferentes unidades. Rancho "El Bayonero". Ciclo primavera – verano 1998.

T	A	B	C	D
1	0	0	0	0
2	25	80.20	183.77	863.03
3	50	160.40	367.54	1726.07
4	75	240.59	551.28	2589.11
5	100	320.79	735.05	3452.15
6	125	400.99	918.82	4315.19
7	150	481.19	1102.58	5178.23

Literal	Descripción
T	= Tratamientos
A	= mg P kg ⁻¹
B	= (A) · (3.2070) kg P ha ⁻¹
C	= (B) · (2.29137) kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹
D	= H ₃ PO ₄ aplicado por unidad experimental pureza del 95 por ciento (ml)

Diseño Experimental

Para los siete tratamientos en estudio, se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones, produciendo como resultado un total de 28 unidades experimentales distribuidas en una superficie agrícola de 2500 m².

Aplicación de los Tratamientos

La aplicación de los tratamientos se efectuó posterior a los 40 días después de la siembra, momento en el cual se constató que el sistema radicular de las plantas del cultivo de papa alcanzaron un desarrollo considerable que garantizó con esto una óptima absorción del fósforo por las plantas. En la aplicación de los tratamientos se utilizó como fuente fosfatada el ácido fosfórico, que de acuerdo al tipo de tratamiento que se suministró el ácido se midió con probetas graduadas y enseguida se depositó en un recipiente (tanque) con capacidad de 450 litros, aquí el ácido se mezcló en tanta agua como se necesitó para completar 400 litros de solución de fósforo para aplicarse. A continuación por medio de un sistema de fertirrigación, la solución preparada correspondiente al tratamiento dos (T2) fue distribuida en forma simultánea en las parcelas indicadas de cada una de las cuatro repeticiones. Este procedimiento se repitió para cada uno de los siguientes tratamientos en estudio, como se muestra en el Cuadro 3.10.

El sistema de fertirrigación portátil se compuso por un recipiente de 450 litros de capacidad, bomba hidráulica de pistón de inyección intermitente, tubería de PVC de diferentes calibres de distribución, mangueras de hule flexibles, conectores hidráulicos, cintilla plástica calibre 8000 y generador de corriente eléctrica de 110 volts.

Cuadro 3.10. Tratamientos en estudio, expresados en diferentes unidades en función del peso del suelo de la unidad experimental.

T	A	B	C	D	E	F
1	0	17,707.6	0	0	0	0
2	25	17,707.6	442.69	1400.58	821.94	863.03
3	50	17,707.6	885.38	2801.17	1643.88	1726.07
4	75	17,707.6	1328.07	4201.76	2465.82	2589.11
5	100	17,707.6	1770.76	5602.34	3287.76	3452.15
6	125	17,707.6	1213.45	7002.93	4109.70	4315.19
7	150	17,707.6	2656.14	8403.52	4931.64	5178.23

Literal	Descripción
T	= Tratamientos
A	= Concentración de Fósforo expresado mg kg^{-1}
B	= Peso del suelo de la unidad experimental (kg)
C	= Fósforo aplicado por unidad experimental (g)
D	= H_3PO_4 aplicado por unidad experimental (g)
E	= H_3PO_4 aplicado por unidad experimental con pureza del 100 por ciento (ml)
F	= H_3PO_4 aplicado por unidad experimental pureza del 95 por ciento (ml)

Características de las Unidades Experimentales

Previo al momento de la siembra se midió la superficie y de acuerdo con el croquis de campo se delimitaron las unidades experimentales por medio de estacas, de esta manera quedó lista la superficie para el establecimiento del experimento. Las dimensiones de las unidades experimentales y otros datos de importancia en el trabajo de investigación se muestran en el Cuadro 3.11.

Cuadro 3.11. Características de las unidades experimentales.

Localidad	Rancho "El Bayonero"
Diseño experimental.....	Bloques al azar
Fecha de siembra.....	21 de mayo de 1998
Número de tratamientos.....	7
Número de repeticiones.....	4
Número de surcos por unidad experimental.....	6
Longitud de surcos.....	10 m
Distancia entre surcos.....	0.92 m
Número de tubérculos sembrados por surco.....	51 tubérculos
Área de la unidad experimental.....	55.20 m ²
Área de la parcela útil.....	33.12 m ²
Distancia entre unidades experimentales.....	1.0 m
Número de surcos cosechados.....	4
Longitud del surco cosechado.....	6.0 m

Riegos

Los riegos se aplicaron mediante un sistema de riego por aspersión, el cual se conectó a hidrantes de distribución por medio de tubería de aluminio, sin incluir el riego de presiembra para inducir el crecimiento de maleza, en total se aplicaron seis riegos con una lámina de riego promedio de 7 a 8 cm y un tiempo promedio entre riegos de 23 días, como se muestra en el Cuadro 3.12.

Cuadro 3.12. Calendario de riegos aplicados al cultivo de papa, Rancho el Bayonero, ciclo primavera – verano 1998.

Fecha de aplicación	Días transcurridos entre un riego y otro	Días después de la siembra
Mayo 23 de 1998	0	2
Junio 15 de 1998	23	25
Julio 10 de 1998	25	50
Agosto 1 de 1998	22	72
Agosto 25 de 1998	24	95
Septiembre 17 de 1998	23	118

Manejo del Cultivo

El productor cooperante quien mostró siempre su amplia disposición para desarrollar la investigación y presto el área agrícola para establecer el experimento de validación, proporcionó los medios para ofrecer un manejo integral y semejante al manejo del cultivo comercial, aportando trabajadores de campo, insumos, agroquímicos, maquinaria agrícola, aspersiones foliares de

fungicidas, insecticidas, bactericidas, así como macro y micronutrientes. Por otro lado, para tener un excelente control de malas hierbas se desarrolló un programa integral que consistió en la aplicación de Metribuzina en conjunción con el uso de maquinaria agrícola y deshierbe manual, ver Cuadro 3.13.

Cuadro 3.13. Agroquímicos empleados en la fertilización foliar y el control químico de la maleza, durante el desarrollo del cultivo de papa. Rancho "El Bayonero". Ciclo primavera - verano de 1998.

Agroquímicos	Composición	Dosis
Zimafert(Biocampo)	Zn, Mg	10 L·ha ⁻¹
Acido Cítrico	-----	200 g·ha ⁻¹
Lexone DF.metribuzina	Herbicida	1000 g·ha ⁻¹

Control de Enfermedades

Se realizaron aspersiones foliares aéreas en forma periódica con el propósito de evitar la aparición de enfermedades causadas por hongos como el tizón temprano (*Alternaria solani*) y el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) (Mildiú), con los productos fungicidas Manzate al 80 por ciento (2.5 kg ha⁻¹) y Ridomil (2 kg ha⁻¹). De la misma manera para evitar la aparición de la enfermedad llamada marchitez y necrosis de la papa, causado por los hongos *Fusarium*, *Verticillium* y *Colletotrichum* además de una combinación compleja de una serie de factores que inciden desatando esta enfermedad, se aplicó de manera preventiva Benomyl, Carbendazim, Captan y Mancozeb (4 kg ha⁻¹); TCMTB (2-3 kg ha⁻¹); Tiabendazol (2 kg ha⁻¹).

Rendimiento de Tubérculos

A los 142 días después de la siembra, el 10 de octubre de 1998 se procedió a desvarar el cultivo por medio de maquinaria adecuada para tal fin y 20 días después de esta práctica se llevó a cabo la cosecha el 30 de octubre del mismo año.

El rendimiento de tubérculos se evaluó cosechando la parcela útil de cada unidad experimental. La extracción de los tubérculos se llevó a cabo mediante la utilización de “bieldos” y la recolección de éstos se efectuó en forma manual. Con el objetivo de tener un mayor grado de exactitud con los datos de la cosecha, se procedió a poner dentro de un costal todos los tubérculos producidos en un solo surco, repitiéndose esta operación con los tres surcos restantes de la parcela útil. A continuación, de acuerdo con las especificaciones y estándares que rigen en el mercado nacional, los tubérculos cosechados por surco se clasificaron por su tamaño, en papa de primera, segunda, tercera, cuarta y mono, ver Cuadro 3.14. Posteriormente, se pesaron separadamente para obtener el rendimiento de papa de cada una de las categorías por surco y por parcela, así como el rendimiento total por parcela.

Cuadro 3.14. Dimensiones de los tubérculos de acuerdo a la clasificación y a los estándares nacionales. (cm).

Tipo de tubérculo	Diámetro Polar		Diámetro ecuatorial	
	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Mínimo (cm)	Máximo (cm)
Papa de primera	9.70	10.25	5.30	7.70
Papa de segunda	6.75	7.80	4.35	6.25
Papa de tercera	4.35	5.25	3.35	4.35
Papa de cuarta	3.00	4.35	2.35	3.35

Método de Análisis de Datos

El efecto de los siete niveles de fósforo evaluados a través de la producción del cultivo de papa, se estudio de acuerdo con el siguiente modelo lineal.

$$Y_{ij} = M + T_i + R_j + \varepsilon_{ij}$$

i = 1, 2, 3,,t tratamientos

j = 1, 2, 3,.....,r repeticiones

ε_{ij} = NI (0, σ^2)

Y_{ij} = Respuesta del tratamiento i-ésimo en su repetición j-ésima

M = Media general común a cada una de las unidades experimentales

T_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

R_j = Efecto de la j-ésima repetición

ε_{ij} = Error experimental a la cual se le asume distribución normal e independiente con media cero y varianza constante σ^2

El postulado principal del modelo es: $\varepsilon_{ij} \approx \text{DNI} (0, \sigma^2)$. En estos casos

los tratamientos se consideran como efectos fijos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas de Laboratorio

Isotermas de Adsorción

Isoterma de Langmuir. Método del Fósforo Hidrosoluble

La Figura 4.1 representa los valores de adsorción de acuerdo con la ecuación de Langmuir ($C/(x/m)$ contra C), utilizada por Olsen y Watanabe (1957) y López y Burnham (1974). Para los suelos de los ranchos Bayonero, Venado. Potrero, Erial se tiene una relación lineal en todo el rango de concentración de P en el equilibrio o en solución, oscilando los valores desde 0 hasta $5 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$. La figura muestra rectas con pendientes negativos, en oposición a las encontradas por otros autores como Hsu (1964), Cole *et al.*, (1953), López *et al.*, (1984), Kua y Mikkelsen (1979) y Alvarado y Cajuste (1993). Sin embargo, la Ecuación de Langmuir permite el cálculo de los valores de la capacidad máxima de retención (b) y la constante de energía de adsorción (k). Estos valores para los suelos en estudio se presentan en el Cuadro 4.1. La línea recta para cada caso en particular se ajusta para valores de fósforo en equilibrio inferiores a $0.45 \times 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$. La capacidad máxima de retención de

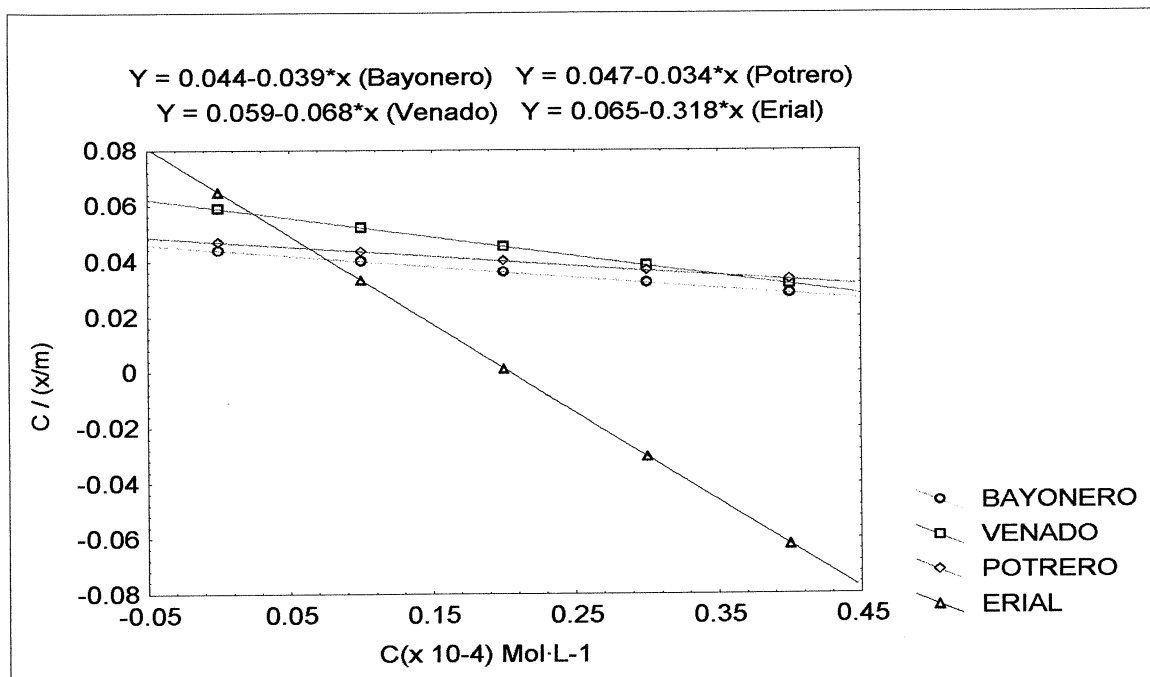


Figura 4.1. Isothermas de adsorción de Langmuir. Suelos de los ranchos Bayonero, Venado, Potrero y Erial. Método del fósforo hidrosoluble.

fósforo (b) sigue el orden: Potrero > Bayonero > Venado > Erial, con valores de 294.12, 256.41, 147.06 y 31.45 en $\mu\text{g de P g}^{-1}$ (ppm), respectivamente.

Cuadro 4.1. Capacidad máxima de adsorción de fósforo (b) y constante de energía de retención (k) de los suelos en estudio, valores calculados a partir de la ecuación de Langmuir.

Localidad	Recta de correlación	Coficiente de correlación	m pendiente	b $\mu\text{g de P g}^{-1}$	k
Potrero	$Y = -0.034x + 0.047$	0.7033	-0.034	294.12	0.7234
Bayonero	$Y = -0.039x + 0.044$	0.7344	-0.039	256.41	0.8864
Venado	$Y = -0.068x + 0.059$	0.7602	-0.068	147.06	1.1526
Erial	$Y = -0.318x + 0.065$	0.6515	-0.318	31.45	4.8922

Syers *et al.*, (1973) presentan valores comprendidos entre 73-990 $\mu\text{g g}^{-1}$ para suelos ácidos de Brasil, mientras que Fox *et al.*, (1970) para suelos tropicales de Hawaii reportan valores de (b) superiores a 2,500 mg de P g^{-1} . Es importante destacar que los valores de la capacidad máxima de retención de fósforo (b) se encuentra íntimamente relacionada con la pendiente de la línea recta de cada suelo, ya que a medida que ésta aumenta, el valor de (b) disminuye y viceversa. Por otro lado, el valor de la constante de retención (k) aumenta al incrementarse la pendiente, lo que muestra un comportamiento contrario a los valores de (b). López *et al.*, (1981), mencionan que la capacidad máxima de retención de aniones se relaciona estrechamente con los elementos del complejo adsorbente del suelo; en particular destaca, para suelos ácidos, de las formas activas del fierro, aluminio y manganeso, mientras que para suelos calcáreos la retención se atribuye fundamentalmente a la presencia de calcio, como lo señala Larsen (1967).

El Cuadro 4.2, presenta los valores de las características generales de los suelos. Se observa que entre los valores de contenido de calcio y magnesio y la máxima capacidad de retención hay una relación entre éstos y la capacidad de adsorción del suelo. Los suelos más arcillosos (Bayonero y Potrero) presentan valores de retención más altos que los constituidos por partículas más gruesas (Venado y Erial), en este sentido Olsen y Watanabe (1957), mencionan que la textura de un suelo influye sobre la cantidad máxima de fósforo (P) que puede adsorber un suelo calcáreo; esta cantidad es mayor

conforme aumenta el contenido de arcilla.

Cuadro 4.2. Capacidad máxima de retención (b), la constante de energía de retención (k) y algunas propiedades de los suelos en estudio.

Características	Potrero	Bayonero	Venado	Erial
Capacidad máxima de retención (b)	294.12	256.41	147.06	31.45
Constante de energía de retención (K)	0.7234	0.8864	1.1526	4.8922
Capacidad de intercambio cationico (meq•100g ⁻¹)	66.465	41.734	73.421	68.784
pH en agua	7.7	7.8	7.7	7.8
Materia Orgánica (%)	3.0119	2.8404	3.1833	2.4487
Carbonatos totales (%)	20.041	16.161	13.926	25.255
Calcio meq L ⁻¹	12.7	8.5	15.5	24.0
Magnesio meq L ⁻¹	8.75	3.5	4.75	19.5
Bicarbonatos meq L ⁻¹	4.5	4.0	5.25	3.75
Sulfatos meq L ⁻¹	32.55	28.70	17.13	64.26
Arena (%)	35.90	10.45	48.10	48.40
Limo (%)	40.35	44.55	29.40	49.10
Arcilla (%)	23.75	45.00	22.50	2.50
Densidad aparente (g cm ⁻¹)	1.136	1.111	1.087	1.078

La materia orgánica, no juega un papel determinante en la capacidad de retención de los suelos, pero existen discrepancia con relación a este fenómeno, debido a la dualidad de la materia orgánica, que puede fijar fosfatos, sobre todo a través de los complejos calciformes, pero también se sabe de la capacidad que tienen los derivados de la materia orgánica para bloquear los

sitios de adsorción López *et al.*, (1979) y Nagarajah *et al.*, (1968). El humus normalmente cargado negativamente, no se considera que retiene mucho P por sí mismo en los suelos; sin embargo, en asociación con cationes como Fe^{+3} , Al^{+3} , y Ca^{+2} es capaz de retener cantidades significativas. Holford y Mattingly (1975) sugieren que en suelos calcáreos la materia orgánica y el P compiten por los mismos sitios para la adsorción en las superficies de CaCO_3 y concluyen que la adsorción de la materia orgánica en estos suelos disminuyó la energía de adsorción (k) del P adsorbido. Por otro lado, al relacionar los valores de la constante de energía de adsorción (k) con el contenido de materia orgánica de los suelos estudiados, se aprecia que existe entre ambas propiedades una tendencia negativa, ya que al aumentar el contenido de la materia orgánica el valor de (k) disminuye. Datta y Srivastava mencionados por López (1984) indican que para suelos de la India con el mismo nivel de sesquióxidos de hierro y aluminio, la energía de adsorción o de enlace es menor mientras mayor es su contenido de materia orgánica, (Cuadro 4.2.).

Existen algunas características del suelo que influyen en forma notable en la capacidad máxima de retención de fósforo (b), así para el suelo del Bayonero destacan la cantidad de arcilla (%) y el pH, en el suelo del Venado el contenido de materia orgánica (%), bicarbonatos (meq L^{-1}) y la capacidad de intercambio cationico ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$), en el suelo del Potrero la cantidad de arcilla (%), la densidad aparente (g cm^{-3}) y los carbonatos totales en segundo termino y en el suelo del Erial destacan el pH, carbonatos totales, calcio, magnesio,

sulfatos, no obstante que su valor de contenido de arcilla es el más bajo (Cuadro 4.2).

Isoterma de Temkin. Método del Fósforo Hidrosoluble

López y Burnham (1974) y Bache (1977) indican que han utilizado las isotermas de adsorción de Temkin, y en el presente trabajo de investigación estos modelos de adsorción de fósforo se presentan en la Figura 4.2 para los suelos en estudio.

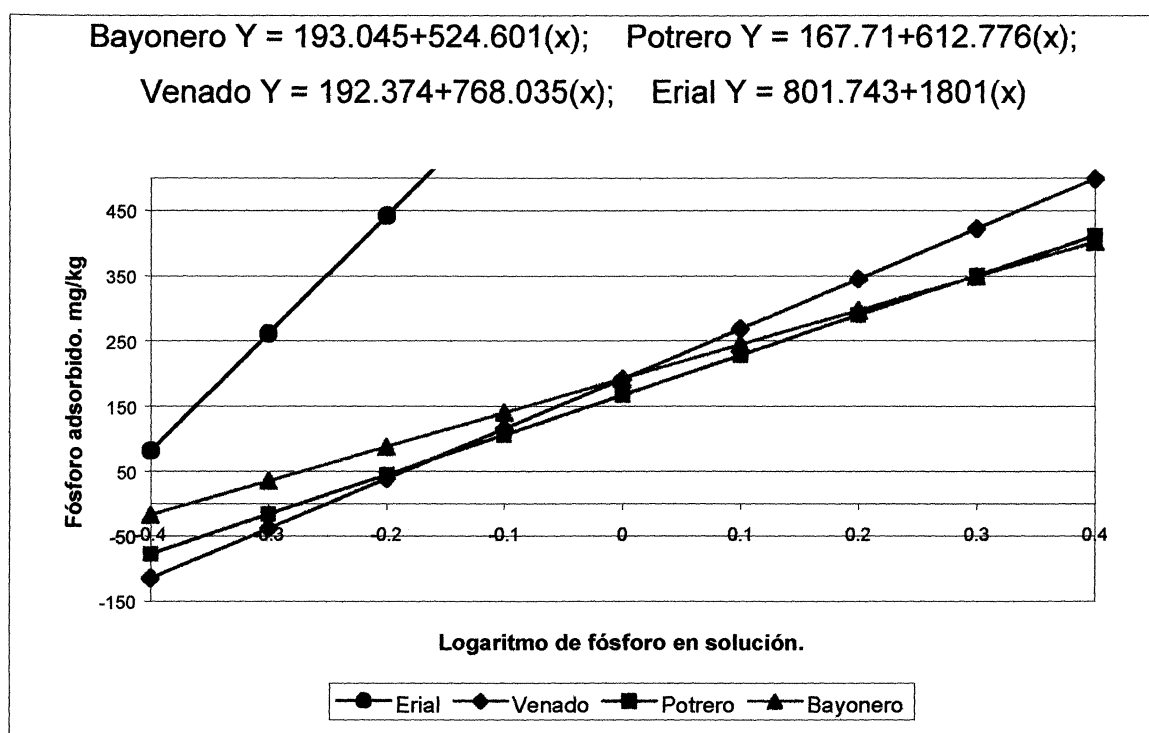


Figura 4.2. Isotermas de adsorción de Temkin. Suelos de los ranchos Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo hidrosoluble.

El modelo de Temkin se presenta en escala semilogarítmica, donde el eje (x) representa los valores de logaritmo de fósforo en solución y en el eje (y) los valores de fósforo adsorbido, expresado como mg de P adsorbido por cada 1000 g de suelo, esto permite estudiar una más amplia gama de concentraciones de fósforo inicial, como es el caso de este estudio donde los niveles de fósforo inicial fluctuaron desde 0 hasta $2500 \mu\text{g g}^{-1}$ de suelo (ppm). Esta situación es más próxima a la realidad, como la señala López *et al.*, (1981), ya que en el sistema suelo coexisten desde concentraciones de fósforo demasiado pequeñas en la solución del suelo ($0.01 \mu\text{g g}^{-1}$) hasta valores relativamente altos. La concentración del fosfato en la solución del suelo, en general, es muy diluida y en un suelo fértil arable es de alrededor de 10^{-5} a 10^{-4} molar (M). Esto es equivalente a cerca de 0.3 a $3 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) de fósforo. En esta investigación el modelo de Temkin se ajustó hasta concentraciones de $6.5 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) de P en solución cuando se trabajó en las diferentes pruebas de adsorción en el laboratorio.

En la Figura 4.2., la pendiente de las rectas representa la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo, así de esta forma se establece que la capacidad amortiguadora sigue el orden: Erial > Venado > Potrero > Bayonero con valores de: 1801, 768.035, 612.776 y 524.601 respectivamente. Olsen y Watanabe (1970), señalan que si la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo es alta, la concentración de fósforo en la solución del suelo puede ser baja y viceversa.

El Cuadro 4.3., muestra los datos de la estimación que hace la isoterma de adsorción de Temkin de la cantidad de P en la solución del suelo cuando cada suelo en estudio ha efectuado una adsorción definida de P; es decir, que cuando en cada suelo se ha llevado a cabo el proceso de adsorción sin importar el tiempo transcurrido para que el suelo adsorba una cantidad de 0, 100, 200, 300, 400 y 500 mg de P por kg de suelo, en ese preciso momento la isoterma estima la cantidad de P que se encuentra en solución, de la misma forma se muestran los valores del logaritmo base 10 de P en la solución.

Cuadro 4.3. Pendiente de las isotermas de adsorción de Temkin, valores de fósforo en solución (mg de P·L⁻¹) y logaritmo de P en solución en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg de P· kg⁻¹), en cuatro localidades de estudio.

Fósforo adsorbido mg·kg ⁻¹	Erial mg P·L ⁻¹	Venado mg P·L ⁻¹	Potrero mg P·L ⁻¹	Bayonero mg P·L ⁻¹
0	0.3588	0.5617	0.5325	0.4286
	-0.4452	-0.2505	-0.2737	-0.3680
100	0.4077	0.7581	0.7754	0.6647
	-0.3896	-0.1203	-0.1105	-0.1774
200	0.4633	1.0231	1.1290	1.0310
	-0.3341	0.0099	0.0527	0.0133
300	0.5265	1.3808	1.6439	1.5991
	-0.2786	0.1401	0.2159	0.2039
400	0.5983	1.8635	2.3939	2.4803
	-0.2231	0.2703	0.3791	0.3945
500	0.6799	2.5150	3.4855	3.8470
	-0.1675	0.4005	0.5423	0.5851
Pendiente de la recta (m)	1801.000	768.035	612.776	524.601

Se ilustra con mas detalle en la Figura 4.3. que los valores más bajos de fósforo en solución corresponden al suelo del rancho el Erial en todos los niveles de fósforo adsorbido. En los niveles de 200 y 300 mg de P adsorbido, los valores de P en solución se observa el orden ascendente: Erial < Venado < Bayonero < Potrero. Solo a partir de 400 mg de P fijado en el suelo, en adelante, se establece el orden también ascendente de P en solución de Erial < Venado < Potrero < Bayonero con 0.5983, 1.8635, 2.3939 y 2.4803 mg de P L⁻¹, respectivamente.

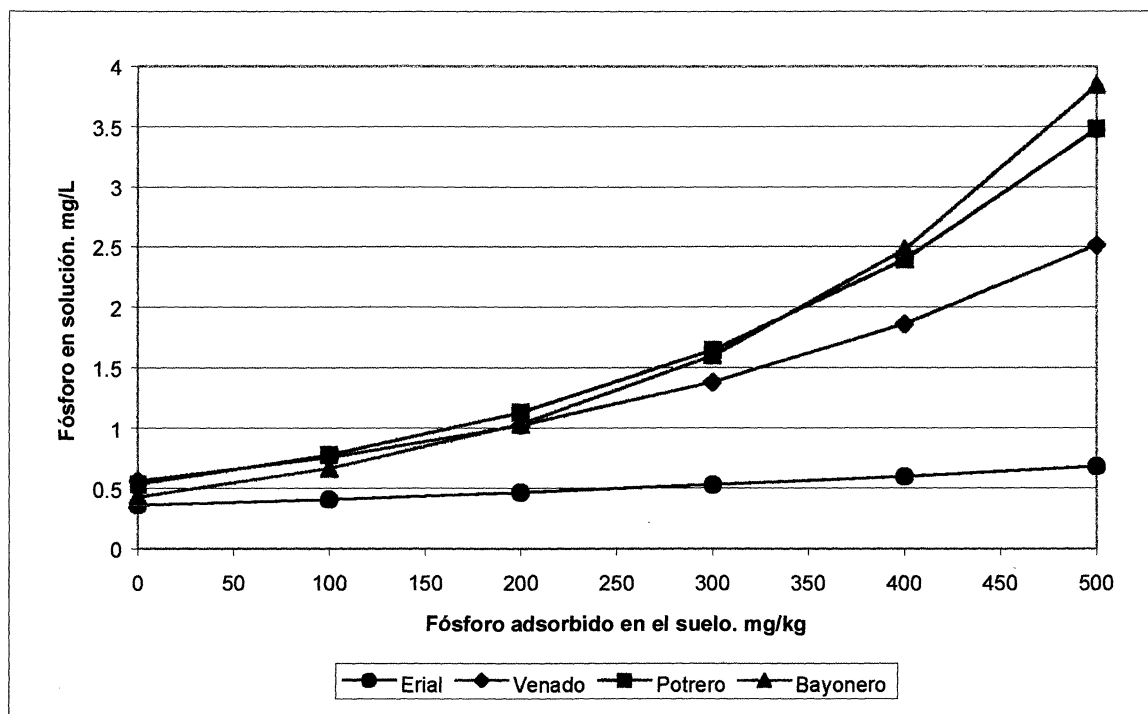


Figura 4.3. Estimación de los niveles de fósforo en solución en mg·L⁻¹, en función de la cantidad de fósforo que esta adsorbido a las partículas de los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo hidrosoluble.

Isoterma de Langmuir. Método del Fósforo en Solución de CaCl₂

Para los suelos en estudio el uso del cloruro de calcio (CaCl₂) 0.01 M como extractante en las pruebas de adsorción, genera datos de fósforo en solución y fósforo adsorbido que observan una fuerte inconsistencia en los lecturas de absorbancia en el colorímetro y por ende un bajo grado de ajuste en el modelo matemático de las Isotermas de Adsorción de Langmuir. Se encontró valores de coeficiente de correlación (r) igual a 0.1442, 0.3246, 0.3865 y 0.6162 por lo que se optó no incluir estos resultados, las ecuaciones y sus respectivas figuras en virtud de su bajo grado de confiabilidad.

Isoterma de Temkin. Método del Fósforo en Solución de CaCl₂

En la Figura 4.4., se presentan las Isotermas de adsorción de Temkin, las cuales se construyen con los datos de las pruebas de laboratorio, cuyo método incluye el uso de CaCl₂ al 0.01M como extractante. El modelo de Temkin describe los niveles de fósforo fijado o adsorbido en función de las concentraciones de fósforo en solución de CaCl₂ 0.01 M, las cuales fluctuaron desde 0.5 a 2 $\mu\text{g g}^{-1}$ (ppm). El Cuadro 4.4., muestra los datos de la estimación que hace la isoterma de adsorción de Temkin de la cantidad de P en la solución del suelo cuando cada suelo en estudio efectuó una adsorción definida de P, de la misma forma se muestran los valores del logaritmo base 10 de P en la solución. También se encuentran los valores de las pendientes de las rectas de las Isotermas de Temkin, cuyos valores son: 521.73, 858.74, 1286 y 1332, para

los suelos del Bayonero, Venado, Erial y Potrero, respectivamente.

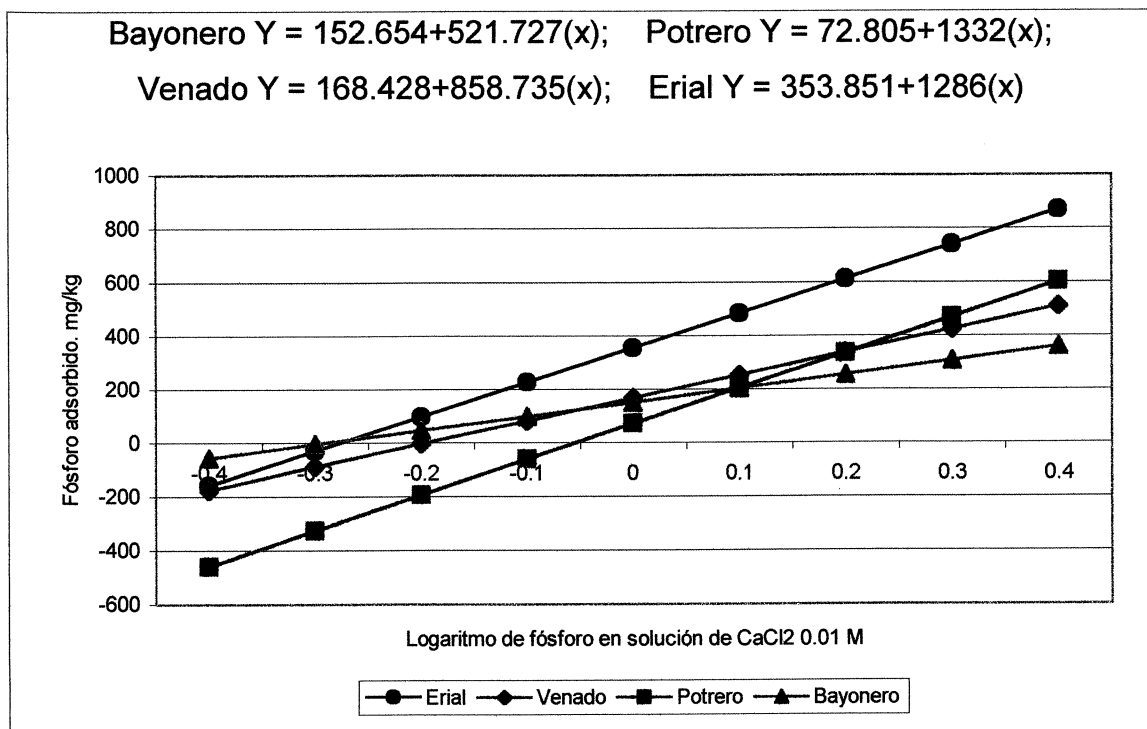


Figura 4.4. Isothermas de adsorción de Temkin. Suelos de los ranchos Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo en solución de CaCl₂.

Lo establecido por Olsen y Watanabe (1970), en el sentido de que si la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo es alta, la concentración de fósforo en la solución del suelo puede ser baja y viceversa, se cumple en forma parcial, ya que de acuerdo a la isoterma de adsorción de Temkin y empleando el método de extracción de CaCl₂ al 0.01 M, cuando los coloides de los suelos adsorben una cantidad de 100 mg de P por kg de suelo, la concentración de fósforo en la solución del suelo es variable con valores de: 1.048 (Potrero), 0.635 (Erial), 0.832 (Venado) y 0.793 (Bayonero) (Cuadro 4.4.). Sin embargo,

se observa que el suelo del Potrero posee la mayor capacidad amortiguadora y debería tener la menor concentración de fósforo, pero esto no es así, debido al tipo de material coloidal del suelo, que adsorbe una cantidad de fósforo, pero a continuación lo pone en solución después de llegar al equilibrio, lo que permite superar al suelo del Erial en este sentido, esto se ilustra con mas detalle al observar la Figura 4.5.

Cuadro 4.4. Pendiente de las isoterms de adsorción de Temkin, valores de fósforo en solución ($\text{mg de P} \cdot \text{L}^{-1}$) y logaritmo de P en solución en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg de P kg^{-1}), en cuatro localidades de estudio.

Fósforo Adsorbido mg kg^{-1}	Bayonero mg P L^{-1}	Venado mg P L^{-1}	Erial mg P L^{-1}	Potrero mg P L^{-1}
0	0.510 -0.293	0.636 -0.198	0.531 -0.275	0.882 -0.055
100	0.793 -0.101	0.832 -0.080	0.635 -0.197	1.048 0.020
200	1.232 0.091	1.087 0.036	0.759 -0.120	1.246 0.095
300	1.916 0.282	1.422 0.158	0.908 -0.042	1.481 0.171
400	2.979 0.474	1.859 0.269	1.086 0.036	1.761 0.246
500	4.632 0.666	2.430 0.386	1.299 0.114	2.093 0.321
Pendiente de la recta (m)	521.73	858.74	1286.00	1332.00

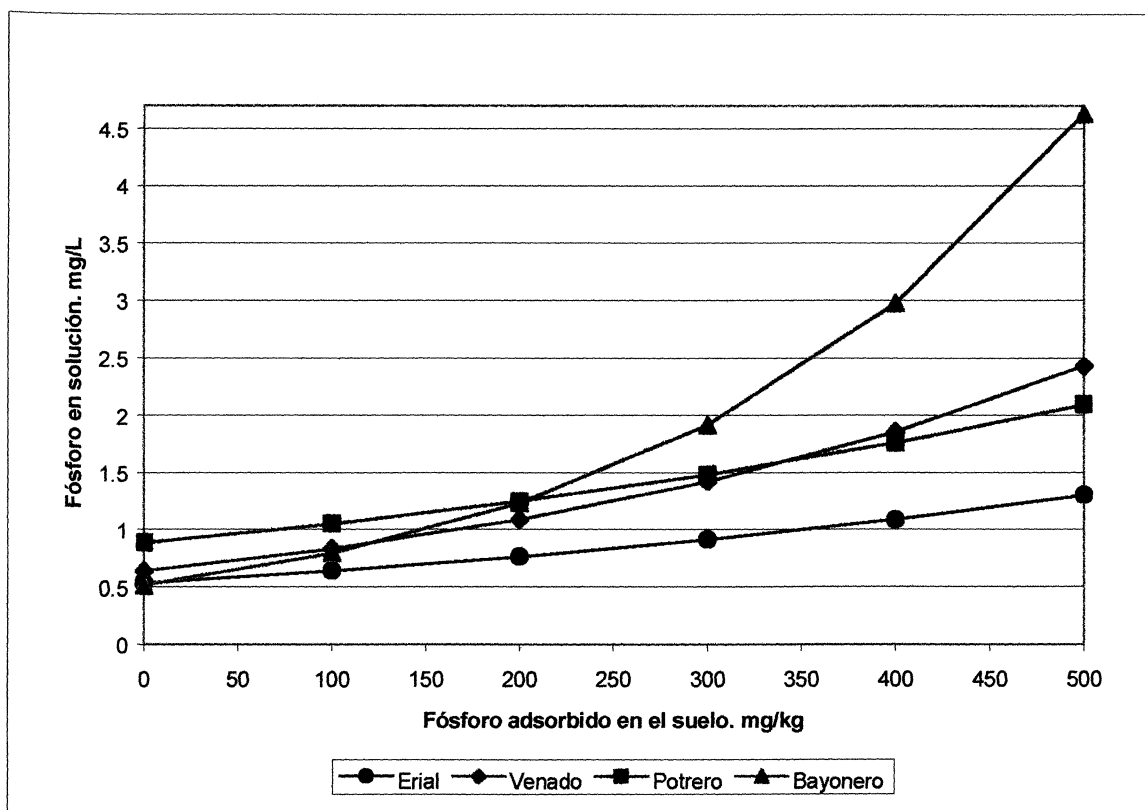


Figura 4.5. Estimación de los niveles de fósforo en solución en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, en función de la cantidad de fósforo que esta adsorbido a las partículas de los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Método del fósforo en solución de CaCl_2 .

En el Cuadro 4.5., se observa que en los niveles desde 0 hasta 200 mg de fósforo adsorbido, se encuentran los valores más altos de fósforo en solución del suelo del rancho el Potrero y en los tres siguientes al Bayonero. Sólo a partir de 400 mg de P adsorbido en el suelo obedece el orden de Erial < Potrero < Venado < Bayonero con valores de 1.086, 1.761, 1.859 y 2.979 mg de P L^{-1} , respectivamente.

Cuadro 4.5. Valores de fósforo en solución (mg L^{-1}) en función de diferentes niveles de fósforo adsorbido (mg kg^{-1}) y la pendiente de las isotermas, en cuatro localidades.

Fósforo adsorbido mg kg^{-1}	Bayonero mg L^{-1}	Venado mg L^{-1}	Erial mg L^{-1}	Potrero mg L^{-1}
0	0.510	0.636	0.531	0.882 *
25	0.569	0.681	0.555	0.920 *
50	0.635	0.728	0.581	0.962 *
75	0.710	0.778	0.607	1.005 *
100	0.793	0.832	0.635	1.048 *
200	1.232	1.087	0.759	1.246 *
300	1.916 *	1.422	0.908	1.481
400	2.979 *	1.859	1.086	1.761
500	4.632 *	2.430	1.299	2.093
Pendiente de la recta (m)	521.73	858.74	1286.00	1332.00

Curvas de Desorción

Curvas de Desorción. Método del Fósforo Hidrosoluble

Las curvas de desorción de fósforo se forman a partir de los datos de fósforo liberado o desorbido ($\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo) en función de las cantidades de fósforo aplicado al suelo al inicio del experimento, los cuales variaron desde 0 hasta $2500 \text{ mg P kg}^{-1}$ de suelo. La Figura 4.6. muestra las curvas de desorción para los cuatro suelos en estudio. Los datos que se obtienen en las pruebas de laboratorio, al utilizar el método del fósforo hidrosoluble de Van der Paauw, se ajustan a ecuaciones logarítmicas en los cuatro casos, ya que el uso

de los modelos lineales y exponenciales arrojan una escasa confiabilidad.

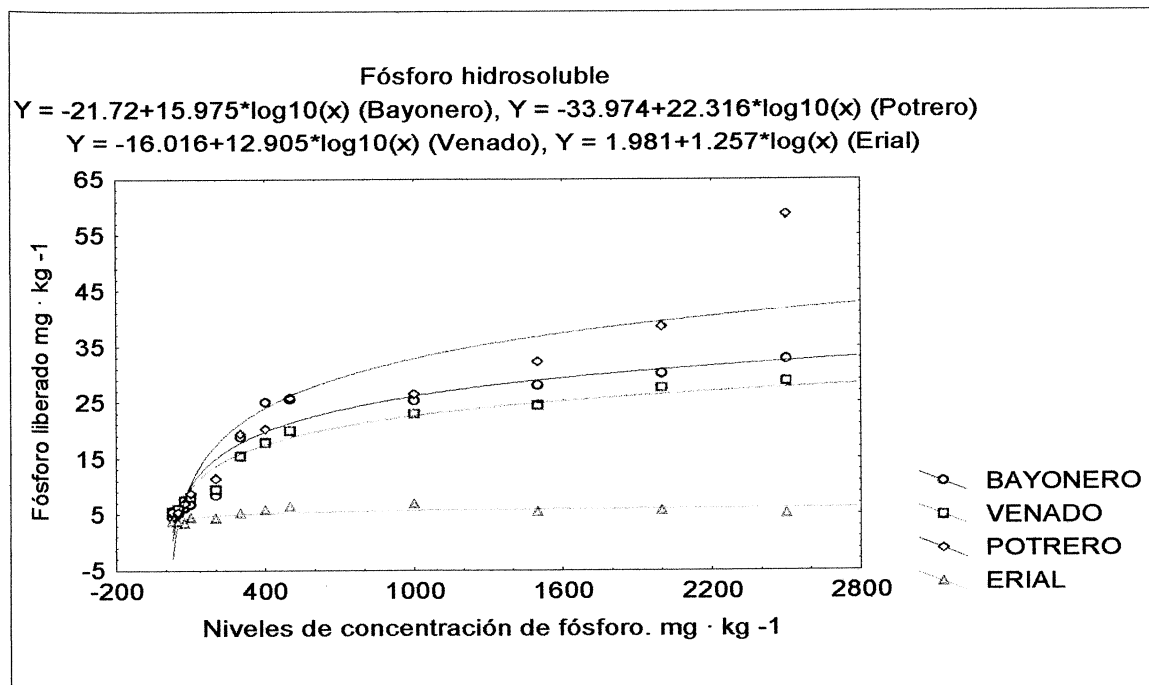


Figura 4.6. Curvas de desorción de fósforo en los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Fósforo liberado expresado en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en función de los niveles de fósforo aplicados al inicio del experimento. Método de fósforo hidrosoluble de Van der Paauw.

Se observa en el Cuadro 4.6., que el grado de liberación de fósforo en todo el rango de concentración de fósforo es variable en los cuatro sitios de estudio, ya que cuando se aplica una cantidad de 100 mg kg^{-1} de fósforo a cada suelo, el suelo del Potrero libera $10.658 \text{ mg de P kg}^{-1}$ de suelo, mientras que los suelos del Bayonero, Venado y Erial liberan cantidades menores de fósforo en solución. En el mismo cuadro se observa que los niveles de liberación de fósforo del suelo del rancho el Erial tienen un incremento relativamente pequeño, en todas las cantidades de fósforo aplicado al inicio del experimento, aquí la curva presenta una curvatura muy ligera en los niveles bajos de fósforo

(0 - 500 mg de P kg⁻¹) y posteriormente la curva prácticamente se transforma en línea recta desde 500 a 2500 mg de P kg⁻¹, lo que indica que cuando se aplica desde 500 hasta 2500 mg de P kg⁻¹ de fósforo al suelo, una cantidad menor del elemento es retenido por la escasa cantidad de coloides del suelo (arcilla 2.5 por ciento), la mayor parte es lixiviado por la acción de la lluvia o el agua de riego, otra parte es precipitada a los estratos inferiores del suelo en virtud de no poseer una mayor cantidad de arcilla que pueda proveer suficientes sitios que sirvan para retener el fósforo aplicado al suelo en forma de fertilizante y otra parte es transformada a compuestos de un alto grado de insolubilidad y no aprovechables por la planta, que sólo a través de una modificación severa del pH del suelo pueden entrar a la solubilidad y ser tomados por las plantas.

Cuadro 4.6. Fósforo liberado en función de cuatro cantidades aplicadas de fósforo al inicio del experimento, (mg P·kg⁻¹ suelo). Método de fósforo hidrosoluble.

Localidad	Ecuación de desorción	100 ppm	500 ppm	1000 ppm	1500 ppm
Potrero	Y= -33.974 + 22.316 (logx)	10.658	26.256	32.974	36.904
Bayonero	Y= -21.720 + 15.975 (logx)	10.230	21.396	26.205	29.018
Venado	Y= -16.016 + 12.905 (logx)	9.794	18.814	22.699	24.971
Erial	Y= 1.981 + 1.257 (logx)	4.495	5.374	5.752	5.973

De acuerdo a lo anterior se establece que el grado de liberación del fósforo desde los coloides del suelo a la solución del mismo, en los cuatro ranchos sigue el orden: Potrero > Bayonero > Venado > Erial. Esto se explica si se consideran los valores de la capacidad máxima de retención de P (b) y la

energía de retención o adsorción de P (k) que se calculó a partir de la isoterma de adsorción de Langmuir (Cuadro 4.7), lo que indica que no obstante que el suelo del Bayonero posee mayor cantidad de arcilla que el suelo del Potrero, las partículas coloidales de éste último suelo poseen una superficie específica y densidad de cargas mayores lo que permite al suelo del Potrero ofrecer más sitios de adsorción de P, comparado con los suelos del Bayonero, Venado y Erial. Por otro lado, los valores de la constante de energía de adsorción (k) son inversamente proporcionales a las cantidades de P liberado ya que a medida que los valores de la constante de energía de adsorción (k) son menores la capacidad de liberación de P de los suelos es mayor.

Cuadro 4.7. Isoterma de adsorción de Langmuir. Capacidad máxima de retención de fósforo (b), la energía de adsorción de fósforo (k) y contenido de arcilla (%).

Propiedades	Potrero	Bayonero	Venado	Erial
Capacidad máxima de retención de fósforo (b)	294.12	256.41	147.06	31.45
Constante de energía de retención de fósforo (K)	0.7234	0.8864	1.1526	4.8922
Arcilla (%)	23.75	45.00	22.50	2.50

Curvas de Desorción. Método del Fósforo en Solución de CaCl_2

Mediante el uso del método propuesto por Fox y Kamprath (1970), que establece el uso de CaCl_2 0.01 M como extractante para determinar el fósforo liberado del suelo, el cual previamente se enriqueció con diferentes cantidades

de fósforo inicial, se logro obtener las curvas de desorción de fósforo para los cuatro suelos en estudio y se presentan éstas en la Figura 4.7.

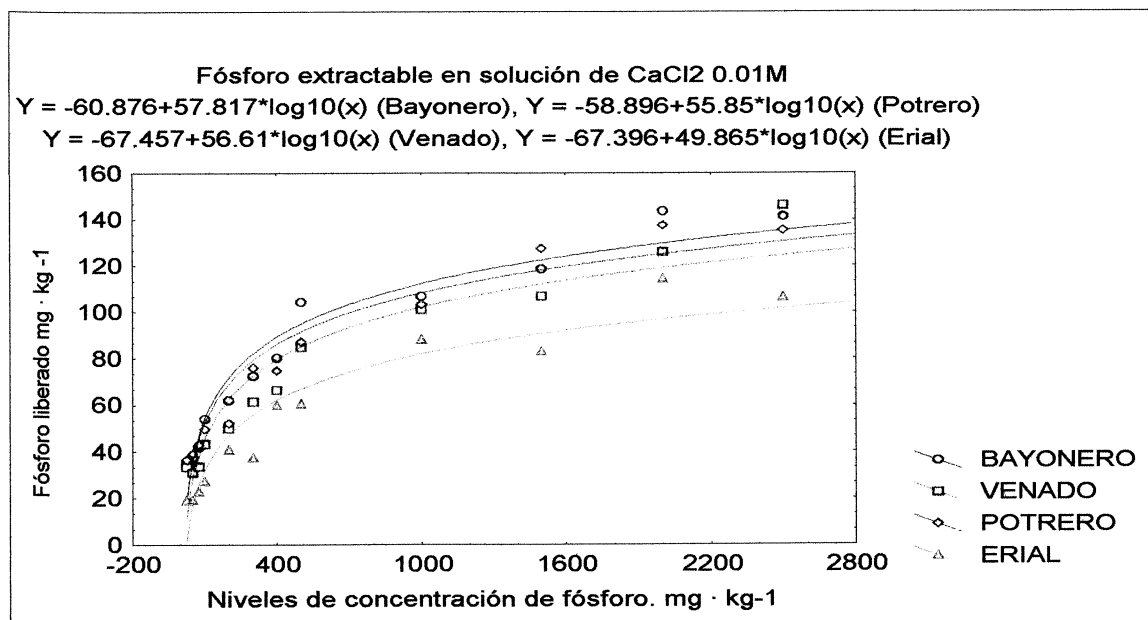


Figura 4.7. Curvas de desorción de fósforo en los suelos del Erial, Potrero, Venado y Bayonero. Fósforo liberado expresado en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en función de los niveles de fósforo aplicados al inicio del experimento. Método del fósforo en solución de CaCl_2 0.01 M.

Los niveles de fósforo liberados en función de los niveles de fósforo aplicados al suelo, se ajustaron a modelos matemáticos logarítmicos en los cuatro casos, describiendo todo el rango de concentraciones de fósforo desde 0 hasta $2500 \text{ mg de P} \cdot \text{kg}^{-1}$ de suelo. Las curvas de desorción de la Figura 4.7., son muy similares a las descritas en la Figura 4.6. del método del fósforo hidrosoluble de Van der Paauw, con la excepción que la curva de desorción del suelo del Erial es más pronunciada en este caso, ya que los valores de P liberado son superiores a los presentados por el método anterior. Aquí se puede apreciar como el agua empleada en el método hidrosoluble es superada por el

extractante CaCl_2 0.01 M, utilizado en este método, ya que es más efectivo para liberar el fósforo adsorbido a los coloides del suelo, así como para llevar a la solubilidad todo aquel P en forma lábil, sin alterar la fracción no lábil del suelo constituida por compuestos fosfatados altamente insolubles en agua, los cuales se formaron en los procesos de fijación del suelo o por el paso del P de la fracción lábil a la fracción no lábil después de la aplicación del P y permanecen en el suelo.

El Cuadro 4.8 muestra que el grado de liberación de fósforo, por el método del CaCl_2 0.01 M, es mejor en todos los niveles de fósforo que se aplicó al inicio del experimento, así como en todos los suelos en estudio, en comparación con los valores observados por el método hidrosoluble, esto es debido al tipo de extractante utilizado en esta parte del experimento, ya que como lo establece Fox y Kamprath (1970), el CaCl_2 es idóneo como extractante de fósforo cuando se trabaja con suelos calcáreos. Por otro lado es importante señalar que el suelo del Bayonero logró liberar más fósforo que el suelo del Potrero, lo que significa que se liberó todo el fósforo que estaba en la fracción lábil, sin liberar aquel fósforo que se encuentra en la fracción no lábil, esto es explicado por el alto contenido de arcilla del suelo del Bayonero con respecto al suelo del Potrero lo que asegura que el suelo del Bayonero posee una gran capacidad de adsorber el P y posteriormente liberarlo sin que el P sea llevado a la fracción no lábil. De esta manera el grado de liberación de fósforo por este método siguió el orden: Bayonero > Potrero > Venado > Erial, exactamente

opuesto a la capacidad amortiguadora (CA) de los suelos descrita por las Isotermas de adsorción de Temkin (Figura 4.2.), esto confirma lo establecido por Olsen y Watanabe (1970), que a mayor capacidad amortiguadora menor contenido de fósforo en la solución del suelo y menor la cantidad de fósforo total liberado y viceversa.

Cuadro 4.8. Fósforo liberado en función de cuatro cantidades aplicadas de fósforo al inicio del experimento, (mg P·kg⁻¹ suelo). Método de CaCl₂ 0.01 M.

Localidad	Ecuación de desorción	100 ppm	500 ppm	1000 ppm	1500 ppm
Bayonero	Y= -60.876 + 57.817 (log x)	54.758	95.170	112.575	122.756
Potrero	Y= -58.896 + 55.850 (log x)	52.804	91.841	108.654	118.489
Venado	Y= -67.457 + 56.601 (log x)	45.763	85.332	102.654	112.342
Erial	Y= -67.396 + 49.865 (log x)	32.334	67.188	82.199	90.980

Experimento de Invernadero

Debido a las características en que el cultivo de papa se desarrolló durante el ciclo vegetativo del experimento de invernadero, variables como el número de tubérculos, peso promedio y peso total de los tubérculos cosechados, diámetro ecuatorial y polar de los tubérculos, reflejan valores, cantidades y dimensiones menores de aquellos datos que se tienen de los tubérculos cosechados en el experimento de campo. Sin embargo, es importante analizar cada una de las variables con el propósito de conocer el

comportamiento de los tratamientos bajo estas condiciones, sin olvidar que el tener a las plantas confinadas en estrechos depósitos es determinante e imposibilita a las mismas poder dar una respuesta mas amplia que permita ofrecer recomendaciones confiables.

Altura de Planta

En la Figura 4.8 se presenta la gráfica de los datos de altura de planta con respecto a los niveles de fósforo aplicados al suelo, aquí se destaca que las plantas producidas en el suelo del rancho el Venado son las más altas en todos los tratamientos, en el suelo del rancho el Bayonero los tratamientos ejercieron un efecto adverso en la altura de las plantas ya que al incrementarse la concentración de fósforo, la altura de las plantas disminuyó, este efecto se presentó también en el suelo del rancho el Potrero pero con menor intensidad y en el suelo del rancho el Erial se presentan las plantas de más corta talla en los tres primeros niveles de fósforo y plantas de porte intermedio con los tratamientos T4 y T5 con 75 y 100 mg de P kg⁻¹, respectivamente.

El Cuadro 4.9. muestra que la variable altura de planta en los suelos de Bayonero, Venado y Potrero los tratamientos no presentan diferencias estadísticas significativas, mientras que en el suelo del Erial se observan diferencias altamente significativas.

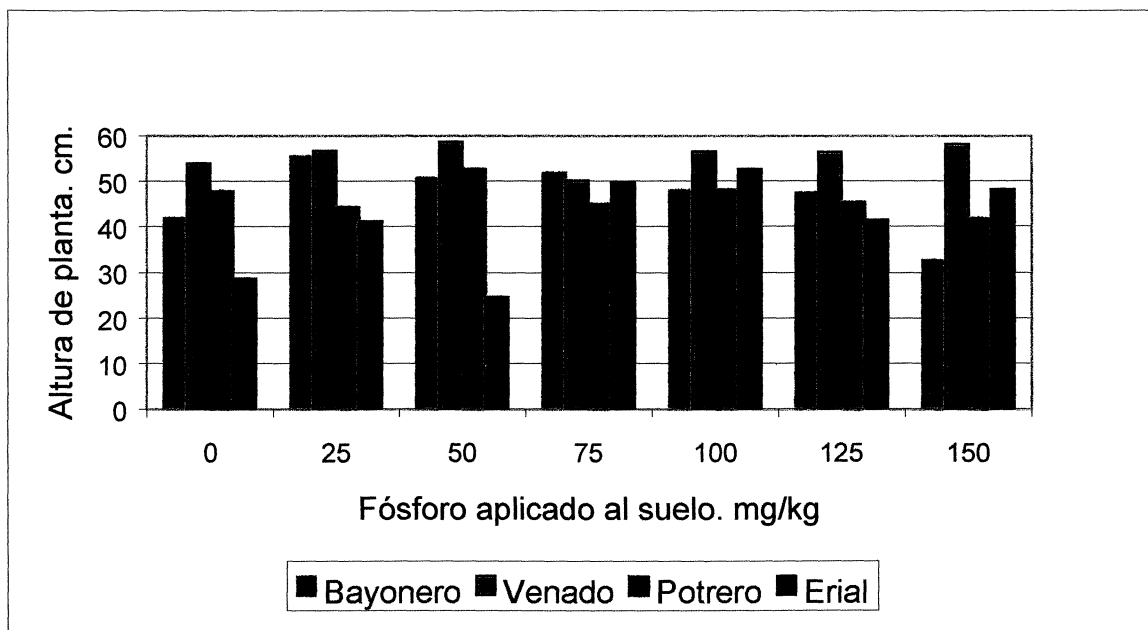


Figura 4.8. Respuesta de la altura de planta (cm) a los niveles de fósforo aplicados al suelo en cuatro localidades.

Cuadro 4.9. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de altura de planta en las cuatro localidades estudiadas.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	2.3791 NS	0.1260 NS	0.4950 NS	4.9049**
Coefficiente de Variación %	20.98	29.44	21.56	23.64

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

En el Cuadro 4.10. se muestra que a través de un análisis matemático las mejores alturas de planta se distribuyen de la siguiente manera: en el suelo del Venado con la dosis de 50 mg P·kg⁻¹ una altura de 58.53 cm, para el suelo

del Bayonero la altura fue de 55.55 cm a una concentración de 25 mg P·kg⁻¹, el suelo del Potrero el tratamiento de 50 mg P·kg⁻¹ produjo una altura de 52.70 cm y el suelo del Erial la altura de planta más baja con 52.53 cm, a una concentración de 100 mg P·kg⁻¹. Cabe destacar que en el suelo del Potrero el testigo superó a la media general, mientras que en los otros sitios no sucedió así. Al suelo del Erial se le tiene que agregar un alto contenido de fósforo para obtener una buena altura de planta ya que la capacidad fijadora de este suelo se ve influida no por su bajo contenido de arcilla sino mas bien por sus altos contenidos de carbonatos totales y calcio, lo que es contrario a los suelos restantes. Silveyra (1984) señala que los altos valores de altura de planta están relacionados con bajos valores de rendimiento, cumpliéndose esto en forma exacta en los suelos del Bayonero y el Venado, mientras que en los suelos del Potrero y el Erial de manera parcial.

Cuadro 4.10. Número de tratamientos y las medias de altura de planta en orden descendente, en centímetros.

Bayonero		Venado		Potrero		Erial		
T	Media	T	Media	T	Media	T	Media	
2	55.50	3	58.53	3	52.70	5	52.53	a
4	51.90	7	57.95	5	48.23	4	49.63	a
3	50.75	2	56.60	1	47.83	7	48.00	a
5	48.05	5	56.43	M*	46.45	6	41.25	ab
6	47.50	6	56.33	6	45.43	2	41.06	ab
M*	46.88	M*	55.66	4	44.93	M*	40.79	
1	41.88	1	53.83	2	44.30	1	28.59	bc
7	32.60	4	50.00	7	41.73	3	24.44	c

Número de Tallos por Planta

En la Figura 4.9, se observan los resultados que corresponden al número de tallos por planta, los tratamientos de fósforo aplicado de 150, 75, 25 mg P·kg⁻¹ a los suelos de los ranchos el Bayonero, el Venado y el Potrero respectivamente produjeron plantas con el mayor número de tallos, mientras que el suelo del rancho el Erial ningún tratamiento logró superar la respuesta que ofreció el testigo, en forma general, se observan plantas con menos de dos tallos por maceta. Las mejores respuestas se observan con valores intermedios de fósforo aplicado en los sitios de estudio, a excepción del Bayonero que produjo plantas con más tallos en el nivel más alto de fósforo.

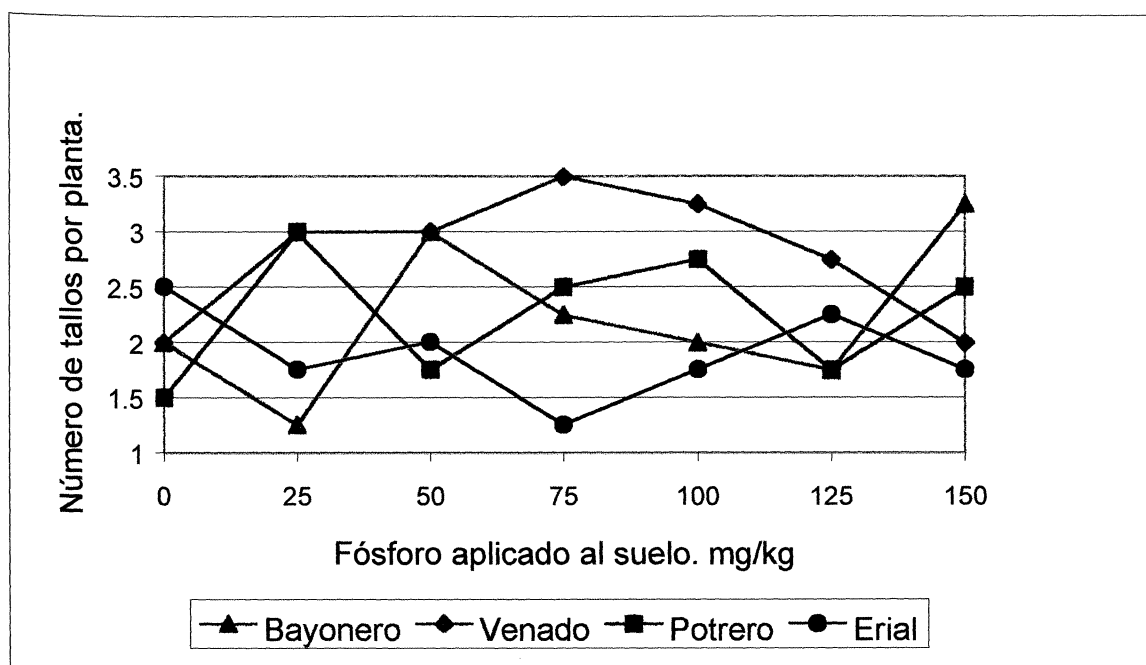


Figura 4.9. Número de tallos por planta de los cuatro sitios estudiados.

En las cuatro localidades de estudio, como se muestra en el Cuadro 4.11., para este variable no se presentan diferencias significativas en los análisis estadísticos, pero los análisis matemáticos muestran diferencias en esta variable.

Cuadro 4.11. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de número de tallos por planta en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	0.9926 NS	0.6665 NS	1.2766 NS	0.5829 NS
Coeficiente de Variación %	24.20	26.46	18.86	20.69

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

El Cuadro 4.12., muestra que el suelo del Venado presenta la mejor respuesta con un promedio de 3.5 tallos por maceta a una concentración de 75 mg P·kg⁻¹. El Bayonero con la concentración de 150 mg P·kg⁻¹ produce un promedio de 3.25 tallos por maceta; el Potrero con el tratamiento 2 (25 mg de P·kg⁻¹) presenta un promedio de 3 tallos por maceta y el Erial con el tratamiento testigo 2.5 tallos por maceta, siendo el valor más bajo en los cuatro sitios. Ortega (1986), menciona que no encontró diferencias significativas en esta variable y los valores promedio en su investigación fueron de 2 a 6 tallos por planta.

Cuadro 4.12. Número de tratamientos y concentración de los valores de número de tallos por planta en orden descendente.

Bayonero		Venado		Potrero		Erial	
T	Media	T	Media	T	Media	T	Media
7	3.25	4	3.50	2	3.00	1	2.50
3	3.00	5	3.25	5	2.75	6	2.25
4	2.25	2	3.00	4	2.50	3	2.00
M*	2.21	3	3.00	7	2.50	M*	1.89
1	2.00	6	2.75	M*	2.25	2	1.75
5	2.00	M*	2.57	3	1.75	5	1.75
6	1.75	1	2.00	6	1.75	7	1.75
2	1.25	7	2.00	1	1.50	4	1.25

Número de Pecíolos Promedio por Planta

En la Figura 4.10 se muestran los valores del número de pecíolos promedio por planta en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. A concentraciones altas de fósforo el número de pecíolos se ve reducido en las plantas, comparadas con aquellas que crecieron a niveles intermedios de fósforo. Hay que destacar que las plantas producidas en el suelo del Bayonero generaron un mayor número de pecíolos, en comparación con aquellas plantas que se desarrollaron en otros ranchos en la mayoría de los tratamientos, incluso en el testigo. Prácticamente la respuesta de los tratamientos en el rancho el Venado es regular, poca variabilidad y discreta. En lo que respecta al rancho el Erial las mejores respuestas son aquellas de los niveles de 75 y 100 mg P kg⁻¹ aplicado al suelo.

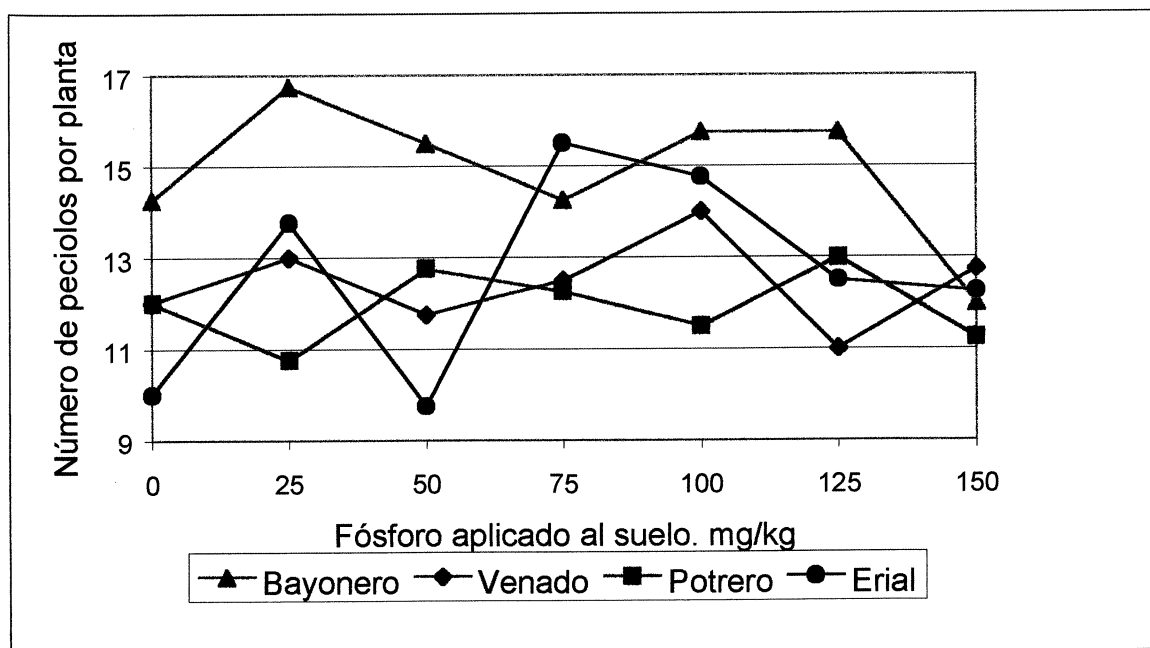


Figura 4.10. Número de pecíolos promedio por planta de los cuatro sitios estudiados.

Los tratamientos no producen diferencias estadísticas significativas en el número de pecíolos promedio por planta en los cuatro sitios de estudio como se observa en el Cuadro 4.13.

Cuadro 4.13. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de número de pecíolos promedio por planta en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	1.3630 NS	0.4815 NS	0.3854 NS	1.7342 NS
Coefficiente de Variación %	17.87	22.38	21.95	26.57

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

El suelo del rancho el Bayonero con 25 mg de P kg⁻¹ obtuvo el mejor valor con 16.75 pecíolos por planta, mientras que el Erial 15.5 pecíolos, El Venado 14 pecíolos y el Potrero 13 pecíolos con las concentraciones de 75, 100 y 125 mg de P kg⁻¹, respectivamente y el tratamiento testigo en el suelo del Potrero superó a la media como se observa en el Cuadro 4.14. En general, de acuerdo a las características de la adsorción del fósforo de los suelos en estudio, el P no quedó en cantidad suficiente en la solución del suelo, lo que limitó que las plantas no muestren una mayor respuesta en esta variable y en consecuencia no se favorece el vigor de las plantas y la producción de biomasa (Ortiz y Ortiz, 1980).

Cuadro 4.14. Número de tratamientos y concentración de los valores de número de pecíolos promedio por planta en orden descendente.

Bayonero		Venado		Potrero		Erial	
T	Media	T	Media	T	Media	T	Media
2	16.75	5	14.00	6	13.00	4	15.50
5	15.75	2	13.00	3	12.75	5	14.75
6	15.75	7	12.75	4	12.25	2	13.75
3	15.50	4	12.50	1	12.00	M*	12.64
M*	14.89	M*	12.43	M*	11.93	6	12.50
1	14.25	1	12.00	5	11.50	7	12.25
4	14.25	3	11.75	7	11.25	1	10.00
7	12.00	6	11.00	2	10.75	3	9.75

Peso Seco de la Planta

En la Figura 4.11., se observa que los datos de la producción de materia seca aérea de las plantas del suelo del Venado son relativamente superiores, en los niveles intermedios de fósforo, a los que presentan los otros sitios de estudio, de manera contraria las plantas del Erial presentan los valores más bajos a excepción de aquel del nivel de 125 mg de P kg⁻¹. La producción de materia seca por los tratamientos en los cuatro ranchos es superior a aquella generada por el testigo, con la excepción de las producciones de materia seca de los tratamientos 25 y 50 mg de P kg⁻¹ en los suelos del Bayonero y el Erial, respectivamente. Sin embargo, la anterior situación no es suficiente para producir diferencias estadísticas significativas en las respuestas de los tratamientos en esta variable.

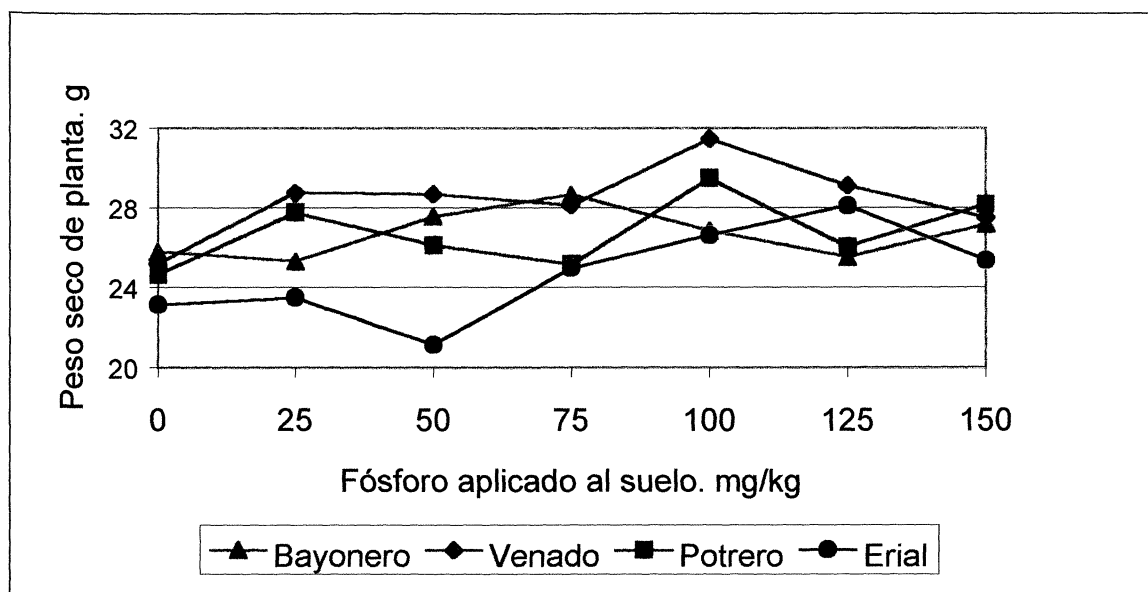


Figura 4.11. Peso seco de planta (g) de los cuatro sitios estudiados.

El Cuadro 4.15 muestra que los tratamientos aplicados a los suelos de los ranchos Bayonero, Venado y Potrero no generan diferencias estadísticas significativas, mientras que en el suelo del rancho el Erial se producen diferencias altamente significativas en la variable peso de materia seca.

Cuadro 4.15. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de peso seco de planta en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	1.6840 NS	1.1107 NS	1.5225 NS	7.7229 **
Coeficiente de Variación %	7.06	12.58	10.63	6.79

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

En el Erial se observa que con un nivel de 125 mg kg^{-1} de P se tiene un valor de 28.08 g. No obstante que en el suelo del Bayonero no hubo diferencia estadísticas significativas en tratamientos, se tiene un peso de 28.64 g de materia seca con el tratamiento de 75 mg kg^{-1} de P. Con una concentración de 100 mg kg^{-1} de P, los suelos del Venado y el Potrero producen plantas cuyo peso de materia seca es de 31.45 y 29.48 g, respectivamente, Cuadro 4.16. Ortega (1986), indica que no hay una relación directa en el peso seco del follaje con el rendimiento del tubérculo, lo cual se ratifica aquí.

Cuadro 4.16. Número de tratamientos y concentración de los valores de peso seco de planta en orden descendente, gramos.

Bayonero		Venado		Potrero		Erial		
T	Media	T	Media	T	Media	T	Media	
4	28.65	5	31.45	5	29.48	6	28.08	a
3	27.55	6	29.13	7	28.18	5	26.58	ab
7	27.18	2	28.75	2	27.75	7	25.33	bc
5	26.83	3	28.68	M	26.76	4	24.93	bc
M	26.69	M	28.40	3	26.10	M	24.65	
1	25.78	4	28.13	6	26.03	2	23.45	cd
6	25.53	7	27.53	4	25.15	1	23.10	cd
2	25.30	1	25.18	1	24.63	3	21.10	d

Número de Tubérculos

En la Figura 4.12., se observa que el mayor número de tubérculos por unidad experimental se presenta en los tratamientos de 75, 100, 125 y 150 mg de P kg⁻¹ en el suelo del Bayonero, mientras que para el Venado se presenta a los 75 mg de P kg⁻¹. En tanto que en el Erial se presenta a los 100 mg de P kg⁻¹. En el caso del Potrero los tratamientos producen un efecto adverso ya que al aumentar los niveles de fósforo, el número de tubérculos tiende a disminuir, contrariamente a lo que ocurre en el rancho el Bayonero que a niveles superiores de fósforo el número de tubérculos aumenta. Sin embargo, los análisis estadísticos no presentan diferencias estadísticas significativas para los tratamientos aplicados a los suelos de las cuatro localidades. Los valores de los

coeficientes de variación fluctúan desde 10.36 a 23.76 por ciento, además de presentarse breves diferencias matemáticas en esta variable (Cuadro 4.17.).

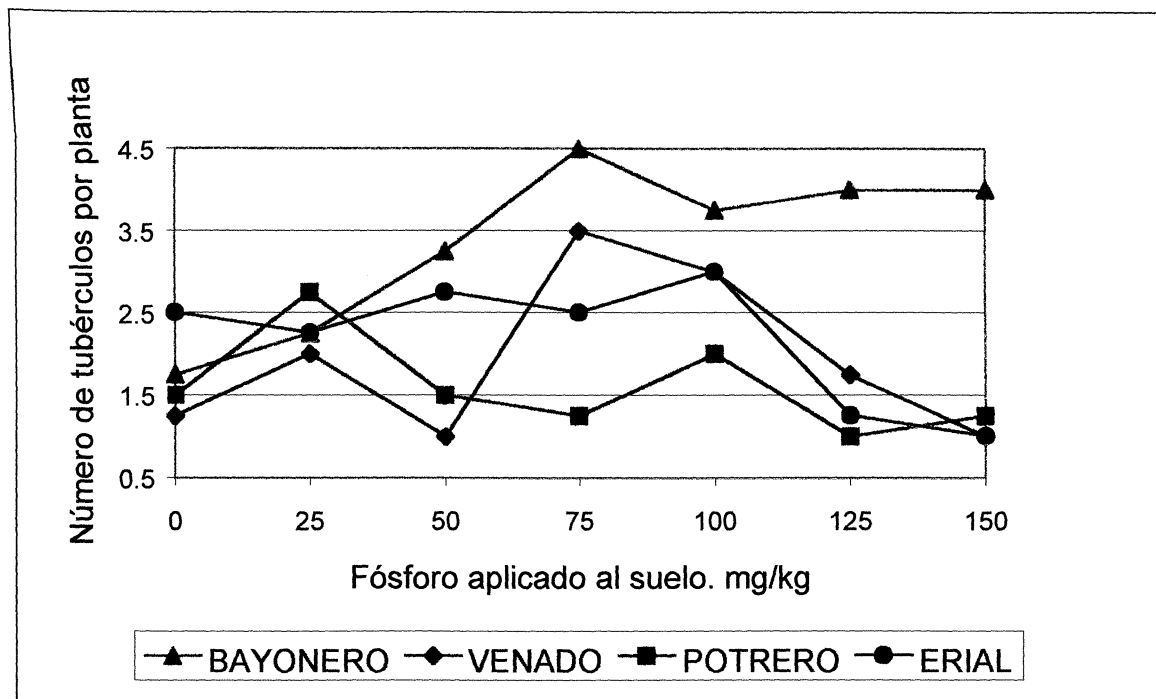


Figura 4.12. Número de tubérculos por planta en cuatro sitios de estudio.

Cuadro 4.17. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de número de tubérculos en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	0.5370 NS	0.7939 NS	0.9669 NS	0.7957 NS
Coeficiente de Variación %	10.36	12.55	23.76	11.24

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

El tratamiento de 75 mg de P kg⁻¹ aplicado a los suelos del Bayonero y el Venado producen en promedio 4.5 y 3.5 tubérculos, respectivamente. Para los suelos del Potrero y el Erial con concentraciones de 25 y 100 mg de P kg⁻¹ se tienen 2.75 y 3.0 tubérculos por planta, respectivamente. Se observa que a concentraciones intermedias de fósforo el número de tubérculos por planta tiende a aumentar en el Bayonero, el Venado y el Erial, pero a concentraciones muy altas de fósforo el número de tubérculos disminuye a uno por planta en los ranchos del Venado, el Potrero y el Erial, no así en el Bayonero. En el Potrero y el Erial, los altos contenidos de carbonatos totales, calcio y magnesio influyen en la capacidad de fijación de fósforo, lo que permite que una gran cantidad de este elemento no este disponible para las plantas, lo que provoca un bajo número de tubérculos por planta, (Cuadro 4.18.).

Cuadro 4.18. Número de tratamientos y concentración de los valores de número de tubérculos en orden descendente.

Bayonero		Venado		Potrero		Erial	
T	Media	T	Media	T	Media	T	Media
4	4.50	4	3.50	2	2.75	5	3.00
6	4.00	5	3.00	5	2.00	3	2.75
7	4.00	2	2.00	M	1.55	1	2.50
5	3.75	M	1.93	1	1.50	4	2.50
M	3.36	6	1.75	3	1.50	2	2.25
3	3.25	1	1.25	4	1.25	M	2.18
2	2.25	3	1.00	7	1.25	6	1.25
1	1.75	7	1.00	6	1.00	7	1.00

Peso Promedio de Tubérculos

En la Figura 4.13., se muestra el peso promedio de tubérculos en el suelo del Bayonero, se observa un buen comportamiento a concentraciones de 100, 125 y 150 mg de P kg⁻¹. En los suelos de los ranchos Venado, Potrero y Erial, los valores mas altos de peso promedio de tubérculos se presentan en concentraciones bajas a intermedias de fósforo, aquí se observa un efecto adverso en los altos niveles de fósforo (superiores a 100 mg P kg⁻¹), destacando que el suelo del Erial es el que ofrece el segundo mejor peso promedio de tubérculo con el tratamiento de 75 mg de P kg⁻¹. En los suelos del Venado, Potrero y Erial los tratamientos producen diferencias estadísticas altamente significativas y en el suelo del Bayonero diferencias significativas en esta variable, los coeficientes de variación fluctúan desde 19.39 a 24.44 por ciento (Cuadro 4.19.).

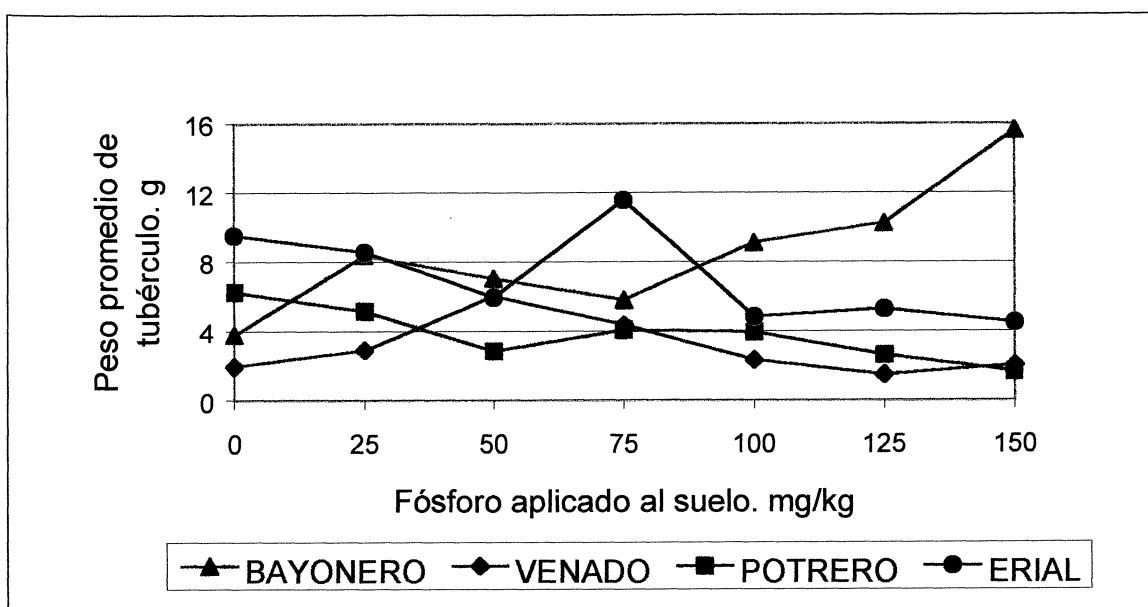


Figura 4.13 Peso promedio de tubérculos (g) de los cuatro sitios estudiados.

Los pesos promedio de tubérculos mas altos son 15.63 g en el Bayonero con el tratamiento de 150 mg de P kg⁻¹, 11.58 g en el Erial con una dosis de 75 mg de P kg⁻¹, 6.25 g en el Potrero con el tratamiento testigo y 6.01 g en el Venado con 50 mg de P kg⁻¹ (Cuadro 4.20.).

Cuadro 4.19. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de peso promedio de tubérculos por planta en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	3.74*	9.31**	2.07**	9.81**
Coeficiente de Variación %	24.41	19.39	23.13	24.44

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

Cuadro 4.20. Número de tratamientos y concentración de los valores de peso promedio de tubérculos por planta en orden descendente, gramos por unidad experimental.

Bayonero			Venado			Potrero			Erial		
T	Media		T	Media		T	Media		T	Media	
7	15.63	a	3	6.01	a	1	6.25	a	4	11.58	a
6	10.26	ab	4	4.35	ab	2	5.15	ab	1	9.51	ab
5	9.11	bc	M	3.01		4	4.08	abc	2	8.52	b
2	8.35	bc	2	2.90	bc	5	3.95	bcd	M	7.14	
M	8.03		5	2.34	bc	M	3.80		3	5.92	c
3	7.04	bc	7	2.05	bc	3	2.85	cd	6	5.25	c
4	5.79	bc	1	1.95	bc	6	2.62	cd	5	4.79	c
1	3.79	c	6	1.49	c	7	1.68	c	7	4.46	c

Peso Total de Tubérculos

En la Figura 4.14., se presentan los datos de rendimiento de tubérculo, se observa que en el suelo del rancho el Bayonero los tratamientos de fósforo generan los más altos valores en el rendimiento de tubérculo y además que todas las respuestas a los tratamientos siempre son superiores al testigo, lo que explica que el suelo tiene una buena capacidad amortiguadora o Buffer con respecto a niveles altos de P y que cuando el elemento es retenido por los coloides del suelo este es liberado en forma continua y en consecuencia lo hace disponible para la planta de acuerdo a su requerimiento.

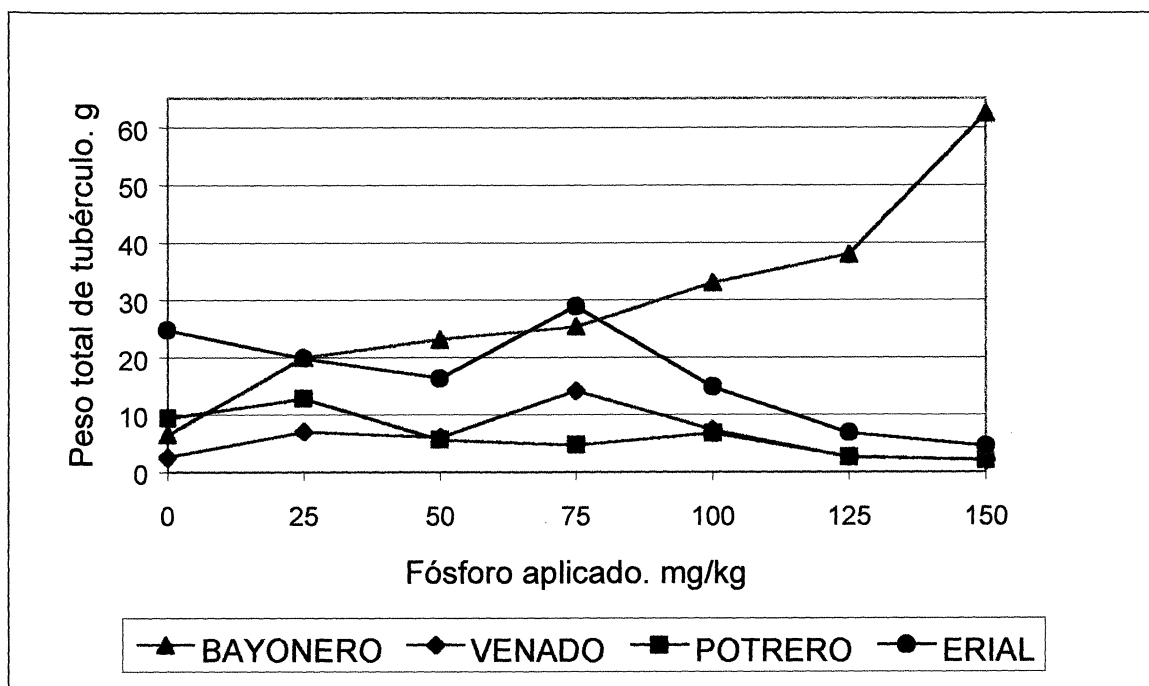


Figura 4.14. Peso total de tubérculos (g) de los cuatro sitios estudiados.

En el suelo del Venado se observa que el más alto rendimiento de peso total de tubérculo se tiene con el tratamiento de 75 mg de P kg⁻¹ y que el nivel más alto de fertilización produce un rendimiento que es superado por aquel del testigo. En el suelo del Potrero se muestra una respuesta negativa de los tratamientos, ya que el rendimiento del testigo prácticamente supera a todos aquellos de los tratamientos, a excepción del rendimiento de 25 mg P kg⁻¹, se observa claramente que a medida que los niveles de fósforo aumentan los rendimientos disminuyen, lo que indica, que los contenidos de arcilla en el suelo producen una gran adsorción de fósforo y la presencia de calcio y magnesio propician la producción de compuestos fosfatados altamente insolubles en el agua de riego y estos no son aprovechados por la planta, lo que genera una escasa respuesta a los tratamientos y en particular en los niveles altos de este elemento. En el suelo del Erial el mejor peso total de tubérculos se observa con el tratamiento 75 mg de P kg⁻¹ y el segundo mejor rendimiento corresponde al testigo, lo que indica que el suelo no responde a las altas dosis de fertilización fosfatada en virtud de los muy bajos contenidos de arcilla y a sus propiedades físicas y químicas, por lo que se recomienda aplicar niveles bajos e intermedios de fósforo con el fin de evitar pérdida por percolación y precipitación.

El Cuadro 4.21., muestra que el Potrero es el único sitio donde los tratamientos en el suelo generan diferencias altamente significativas en el peso total de tubérculos, pero también se presenta el rendimiento más bajo comparado con las otras localidades. No se observan diferencias estadísticas significativas en los tratamientos aplicados a los suelos de los ranchos

Bayonero, Venado y Erial, por otro lado los coeficientes de variación oscilan desde 15.05 a 19.97 por ciento. En el suelo del Bayonero con altas concentraciones de fósforo se tiene un adecuado incremento en el rendimiento, el cual aumenta conforme se incrementa el nivel de P_2O_5 , en contraste con el rendimiento del Potrero y coincide con las funciones del fósforo descritas por el INPOFOS (1997) y Silveyra (1984) en el sentido de que el rendimiento es inversamente proporcional con la altura de planta y materia seca. Con 75 mg de $P\text{ Kg}^{-1}$ en los suelos del Erial y el Venado se tienen rendimientos de 28.91 y 14.22 g por unidad experimental, respectivamente. El suelo del Erial tiene bajo contenido de arcilla con respecto al suelo del Venado; pero más calcio y magnesio, lo que determina la disponibilidad del elemento para la planta a concentraciones intermedias de P como se observa en el Cuadro 4.22.

Cuadro 4.21. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de peso total de tubérculos por planta en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	2.09 NS	1.14 NS	4.61**	1.96 NS
Coeficiente de Variación %	19.97	19.80	15.05	17.47

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

Cuadro 4.22. Número de tratamientos y concentración de los valores de peso total de tubérculos en orden descendente, gramos.

Bayonero		Venado		Potrero			Erial	
T	Media	T	Media	T	Media		T	Media
7	62.51	4	14.22	2	12.79	a	4	28.91
6	38.02	5	7.36	1	9.38	b	1	24.76
5	33.11	2	7.04	5	6.76	bc	2	19.84
M	29.80	3	6.01	M	6.25		M	16.56
4	25.37	M	5.96	4	5.55	bc	3	16.34
3	23.13	6	2.56	3	4.67	bc	5	17.80
2	20.05	1	2.49	6	2.62	bc	6	6.81
1	6.45	7	2.05	7	1.99	c	7	4.46

Diámetro Ecuatorial de Tubérculo

En la Figura 4.15., se muestran los valores del diámetro ecuatorial de los tubérculos producidos en los cuatro suelos de estudio. Se aprecia que en el Bayonero se tienen los tubérculos de mayor dimensión en todos los tratamientos, acentuándose más esta característica en los tratamientos de 100, 125 y 150 mg de P kg⁻¹, en el suelo del Erial se presenta en los tratamientos bajos e intermedios.

En el cuadro 4.23., Los tratamientos aplicados a los suelos de los ranchos el Venado, el Potrero y el Erial muestran diferencias estadísticas significativas en esta variable, de manera que el tamaño de los tubérculos esta en función de las variaciones de los niveles de fósforo. También se observa que

los cuadrados medios de tratamientos presentan diferencias altamente significativas en los suelos de los ranchos el Venado y el Erial, no así en el suelo del rancho el Potrero que solo muestra diferencias significativas, mientras que en el suelo del rancho el Bayonero los tratamientos aplicados al suelo no provocan diferencias estadísticas significativas en esta variable. Sin embargo, en el Bayonero se tienen las papas con las mejores dimensiones. Los valores de los coeficientes de variación oscilan desde 5.08 al 20.69 por ciento.

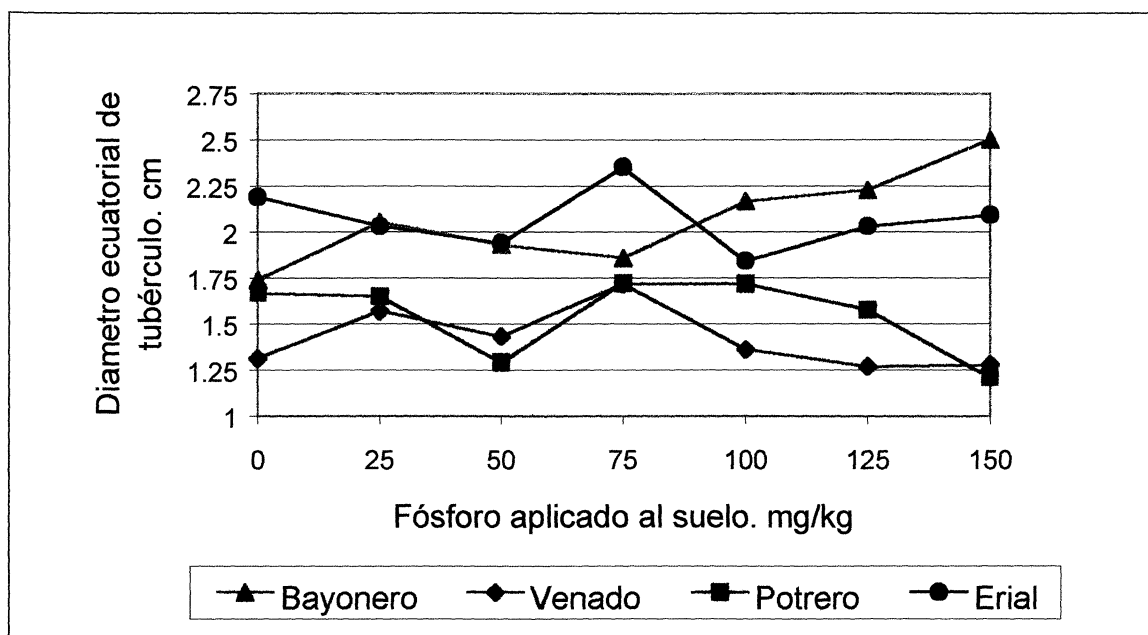


Figura 4.15. Diámetro ecuatorial de tubérculo (cm) de los cuatro sitios estudiados.

Los valores de los diámetros ecuatoriales son 2.50 cm en el Bayonero con 150 mg de P kg⁻¹, de 2.35, 1.72 y 1.72 cm en el Erial, Venado y Potrero respectivamente, con el tratamiento cuatro de 75 mg de P kg⁻¹. El testigo supera la media general en los suelo del Potrero y el Erial. El comportamiento

de los tratamientos en el suelo del Bayonero y el Potrero produce resultados altamente contrastantes, ya que en el Bayonero el tratamiento siete genera los tubérculos mayores, mientras que este mismo tratamiento en el Potrero produce los tubérculos mas chicos, como se aprecia en el Cuadro 4.24.

Cuadro 4.23. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de diámetro ecuatorial de tubérculo en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	1.44 NS	21.76**	3.34*	6.07**
Coefficiente de Variación %	20.69	5.08	14.90	6.56

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

Cuadro 4.24. Número de tratamientos y concentración de los valores de diámetro ecuatorial de tubérculo en orden descendente, cm.

Bayonero		Venado		Potrero		Erial				
T	Media	T	Media	T	Media	T	Media			
7	2.50	4	1.72	a	4	1.72	a	4	2.35	a
6	2.23	2	1.57	b	5	1.72	a	1	2.16	ab
5	2.17	3	1.43	c	1	1.67	a	7	2.09	bc
M	2.07	M	1.42		2	1.65	a	M	2.07	
2	2.05	5	1.36	cd	6	1.58	ab	2	2.03	bcd
3	1.93	1	1.31	d	M	1.55		6	2.03	bcd
4	1.86	7	1.28	d	3	1.29	bc	3	1.94	cd
1	1.74	6	1.27	d	7	1.21	c	5	1.84	d

Diámetro Polar de Tubérculo

En el suelo del Bayonero se establece que a concentraciones altas de fósforo hay una relación directa entre el rendimiento total de tubérculos y las dimensiones de éstos, acorde como lo indica Ortega (1986). En los otros sitios la respuesta es diferente, ya que las mejores dimensiones y rendimientos de tubérculos se tienen a concentraciones intermedias de fósforo (Figura 4.16).

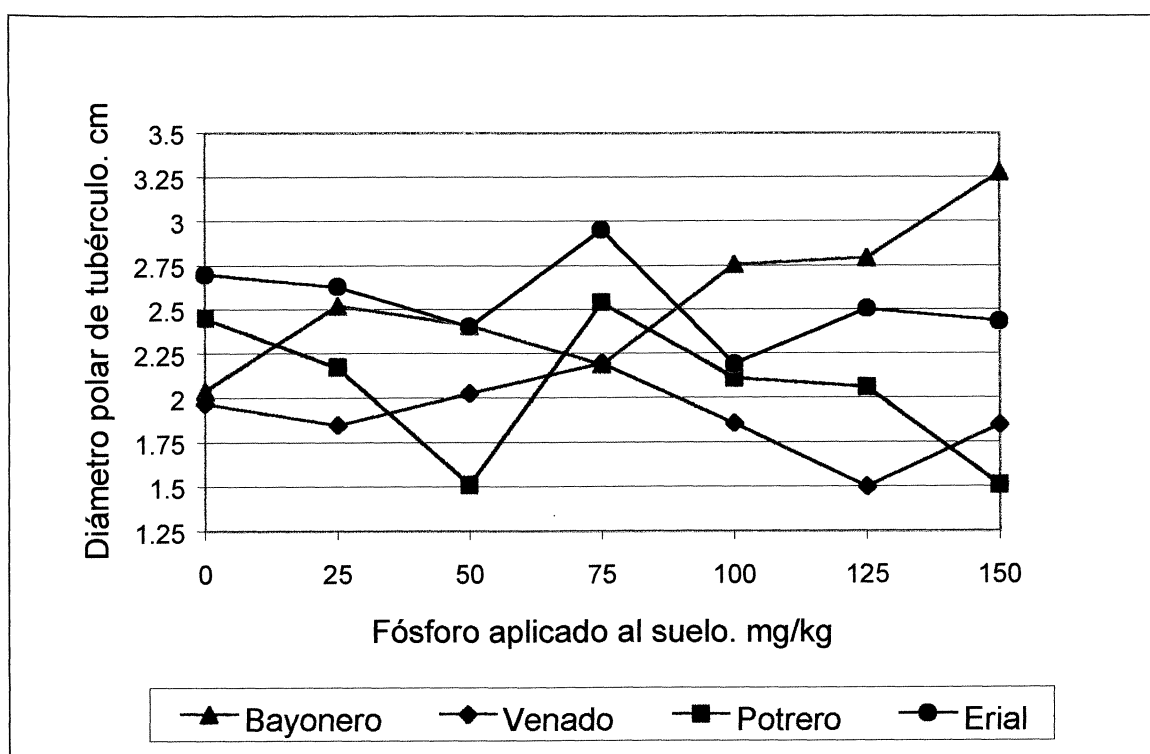


Figura 4.16. Diámetro polar de tubérculo (cm) de los cuatro sitios estudiados.

En el Cuadro 4.25. los tratamientos que se aplican a los suelos de los ranchos el Venado, el Potrero y el Erial generan en esta variable diferencias estadísticas altamente significativas y en el suelo del Bayonero solo se

producen diferencias estadísticas significativas, los coeficientes de variación van desde 6.40 a 18.69 por ciento. El tratamiento cuatro con 75 mg de P kg⁻¹ aplicado en los suelos del Erial, Potrero y Venado produce los mayores diámetros polares de tubérculo y el testigo produce tubérculos con dimensiones superiores a los de la media general, así como de aquellos de los tratamientos de 100, 125 y 150 mg de P kg⁻¹, (Cuadro 4.26).

Cuadro 4.25. Cuadrados medios de tratamientos y coeficientes de variación de diámetro polar de tubérculo en cuatro localidades.

Fuente de variación	L O C A L I D A D E S			
	Bayonero	Venado	Potrero	Erial
Cuadrado Medio de Tratamientos	3.23*	12.55**	4.58**	6.32**
Coeficiente de Variación %	18.06	6.40	18.69	7.65

NS = No Significativo * = Significativo ** = Altamente significativo

Cuadro 4.26. Número de tratamientos y concentración de los valores de diámetro polar de tubérculo en orden descendente, cm.

Bayonero			Venado			Potrero			Erial		
T	Media		T	Media		T	Media		T	Media	
7	3.28	a	4	2.20	a	4	2.54	a	4	2.95	a
6	2.80	ab	3	2.03	ab	1	2.45	a	1	2.70	ab
5	2.76	ab	1	1.97	bc	2	2.17	a	2	2.63	bc
M	2.57		M	1.89		5	2.11	a	6	2.50	bc
2	2.52	bc	5	1.86	bc	6	2.06	ab	7	2.43	bcd
3	2.41	bc	7	1.85	bc	M	2.05		3	2.40	cd
4	2.19	bc	2	1.85	c	3	1.51	b	M	2.26	
1	2.04	c	6	1.5	d	7	1.51	b	5	2.19	d

Experimento de Campo

Análisis del Suelo en Estudio

En el Cuadro 4.27., se muestran los resultados de los análisis físico-químicos del suelo donde se estableció el trabajo de validación. El suelo del rancho el Bayonero posee una profundidad regular de 90 a 110 cm en promedio, con potencial de hidrógeno (pH) ligeramente alcalino, pobre contenido de carbonatos totales, con un contenido de materia orgánica superior al dos por ciento en los primeros 30 cm de profundidad, medianamente rico en fósforo disponible, rico en nitrógeno total y potasio intercambiable, no presenta problemas de salinidad ni sodicidad, aceptable capacidad de intercambio cationico, alto contenido de arcilla y limo, mientras que el contenido de arena es bajo.

Rendimiento de Tubérculo

La Figura 4.17., muestra el rendimiento total de tubérculo y como se distribuye en los rendimientos de papa de primera, segunda, tercera y cuarta, expresado en ton ha^{-1} , mientras que en el Cuadro 4.28., se muestran las medias de los tratamientos para los rendimientos de papa: total, primera, segunda, tercera y cuarta. Los tratamientos con los mejores rendimientos son: el tres, el dos, el siete, el seis y nuevamente el seis en los rendimientos de papa total, primera, segunda, tercera y cuarta, que corresponden a los valores de:

32.633, 15.367, 11.519, 5.254 y 1.700 en ton ha⁻¹. Las diferencias entre los mejores rendimientos y el testigo son: 5.265, 3.417, 2.257, 0.627 y 0.171 en ton ha⁻¹, de acuerdo al orden respectivo.

Cuadro 4.27. Análisis físico-químico del suelo del rancho el Bayonero, en el estrato 0-40 cm de profundidad.

Características	El Bayonero
Materia Orgánica (%).....	2.8404
Nitrógeno Total (%).....	0.2757
Fósforo Aprovechable mg de P kg ⁻¹ (ppm).....	51.993
Potasio Intercambiable(Kg ha ⁻¹).....	986.22
Carbonatos Totales (%).....	16.161
Reacción del Suelo (pH).....	7.8
Capacidad de Intercambio Cationico(meq 100g ⁻¹).....	41.734
Conductividad eléctrica(dsm cm ⁻¹).....	1.005
Extracto de Salinidad (meq L ⁻¹)	
Calcio.....	8.5
Magnesio.....	3.5
Carbonatos Solubles.....	0.0
Bicarbonatos.....	4.0
Cloruros.....	5.0
Sulfatos.....	28.70
Densidad Aparente g (cm ³) ⁻¹	1.111
Arena (%).....	10.45
Limo (%).....	44.55
Arcilla (%).....	45.00
Textura.....	Arcillo-Limoso

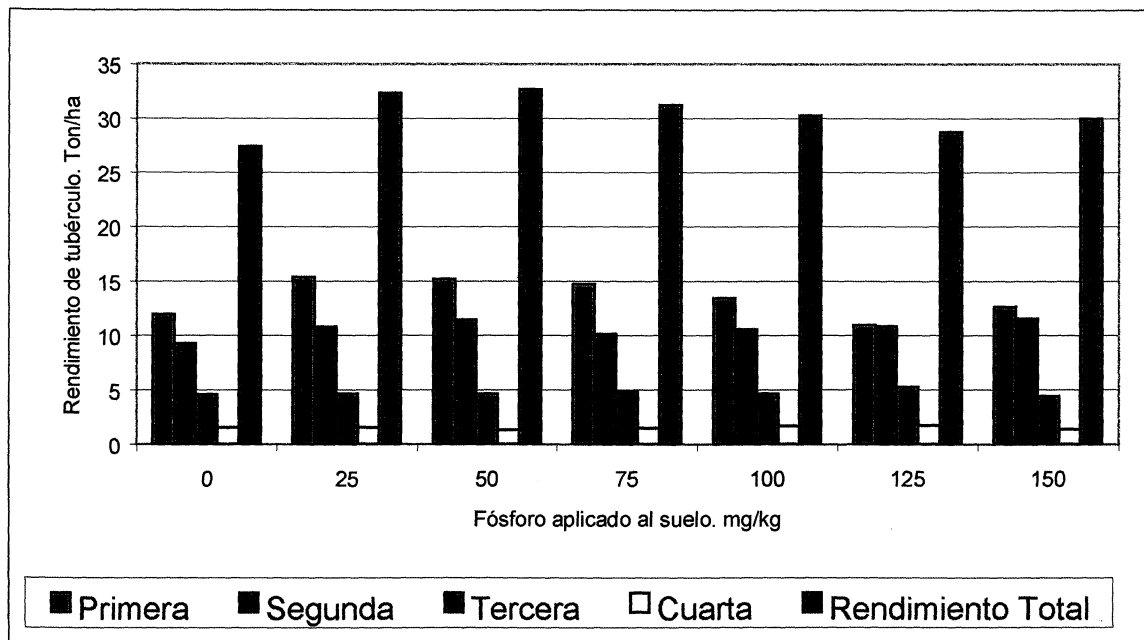


Figura 4.17. Rendimiento total de tubérculo y su distribución en rendimientos de papa de primera, segunda, tercera y cuarta. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

Cuadro 4.28. Concentración de las medias de los rendimientos de tubérculo de primera, segunda, tercera, cuarta y total en $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Fósforo $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Rend. de papa (total)	Rend. de papa (primera)	Rend. de papa (segunda)	Rend. de papa (tercera)	Rend. de papa (cuarta)
0	27.368*	11.950	9.262*	4.627	1.529
25	32.288	15.367*	10.762	4.639	1.520
50	32.633*	15.220	11.433	4.666	1.314*
75	31.175	14.733	10.133	4.839	1.470
100	30.226	13.406	10.536	4.639	1.645
125	28.700	10.927*	10.819	5.254*	1.700*
150	29.940	12.631	11.519*	4.411*	1.379

En la Figura 4.18., se observa que todos los rendimientos de papa de primera son superiores a los registrados en las clasificaciones de papa de segunda, tercera y cuarta, excepto en el caso del tratamiento seis con 125 mg de P kg^{-1} , donde el rendimiento de éste es superado por 506 y 592 kg de tubérculo ha^{-1} en los tratamientos tres y siete, respectivamente.

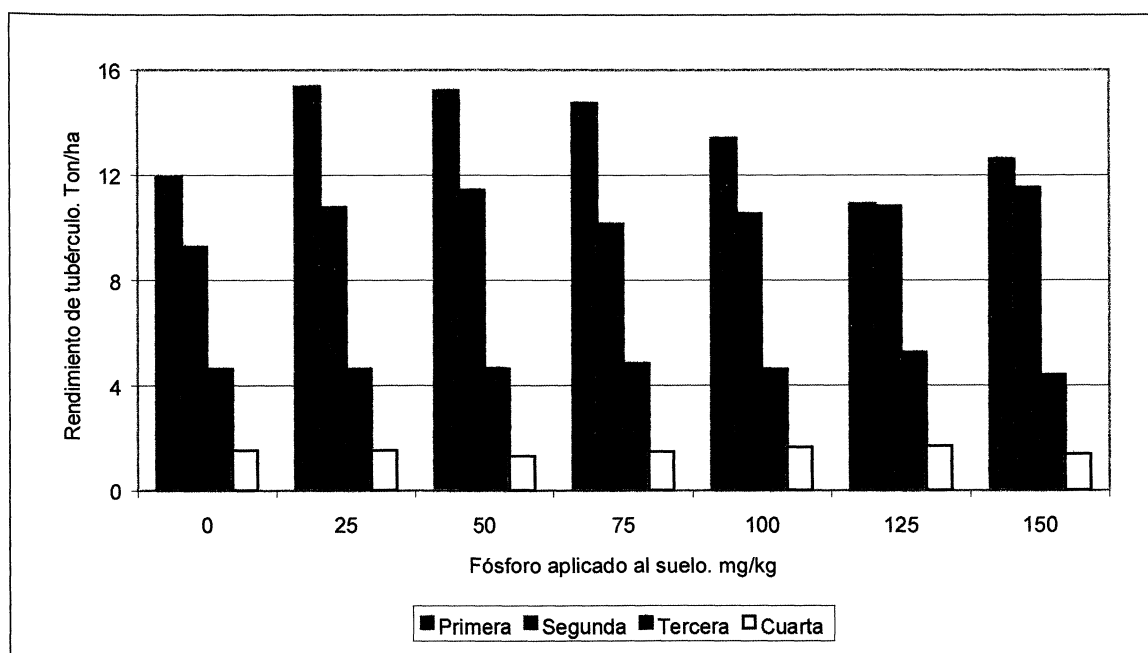


Figura 4.18. Rendimiento de tubérculo de primera, segunda, tercera y cuarta en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

Los mejores tres rendimientos de papa de primera son 15.367, 15.220, 14.733 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ y se lograron con los niveles de P aplicado al suelo de 25, 50 y 75 mg de P kg^{-1} , respectivamente. Los dos mejores rendimientos de papa de segunda son igual o ligeramente superiores al menor rendimiento de papa de primera. En lo que corresponde a papa de tercera el tratamiento siete, con el nivel más alto de fósforo, produce el rendimiento más bajo incluso que aquel

que se produce por el testigo, además todos los tratamiento no logran superar las seis toneladas por hectárea. En papa de cuarta el tratamiento tres es el que produce el más bajo rendimiento y los rendimientos de todos los tratamientos no superaron las dos ton ha⁻¹.

En el Cuadro 4.29., se presenta la concentración de cuadrados medios en las diferentes fuentes de variación de los análisis estadísticos de los datos de rendimiento. Se observa que el rendimiento total de papa y los rendimientos de papa de primera, segunda, tercera y cuarta, no reflejan diferencias estadísticas significativas y sus correspondientes coeficientes de variación fluctúan desde 12.12 hasta 24.19 por ciento.

Cuadro 4.29. Concentración de cuadrados medios y coeficientes de variación encontrados en los análisis estadísticos.

Fuente de Variación	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	Total
Tratamientos	11.827	2.410	0.279	0.075	12.431
Repeticiones	25.510	5.940	1.550	0.256	10.709
Error	10.611	3.099	0.763	0.111	13.715
Coeficiente de Variación %	24.197	16.549	18.497	22.178	12.129

En la Figura 4.19., se observa que poco menos de la mitad del rendimiento total es tubérculo de primera con porcentajes superiores al 45 por ciento, en los tratamientos de 25, 50 y 75 mg de P kg⁻¹. Con respecto a papa de

segunda los mejores porcentajes son superiores al 35 por ciento del rendimiento total en los tratamientos de 125 y 150 mg de P kg⁻¹. Los porcentajes no son superiores al 20 y 10 por ciento del rendimiento total en papa de tercera y cuarta, respectivamente.

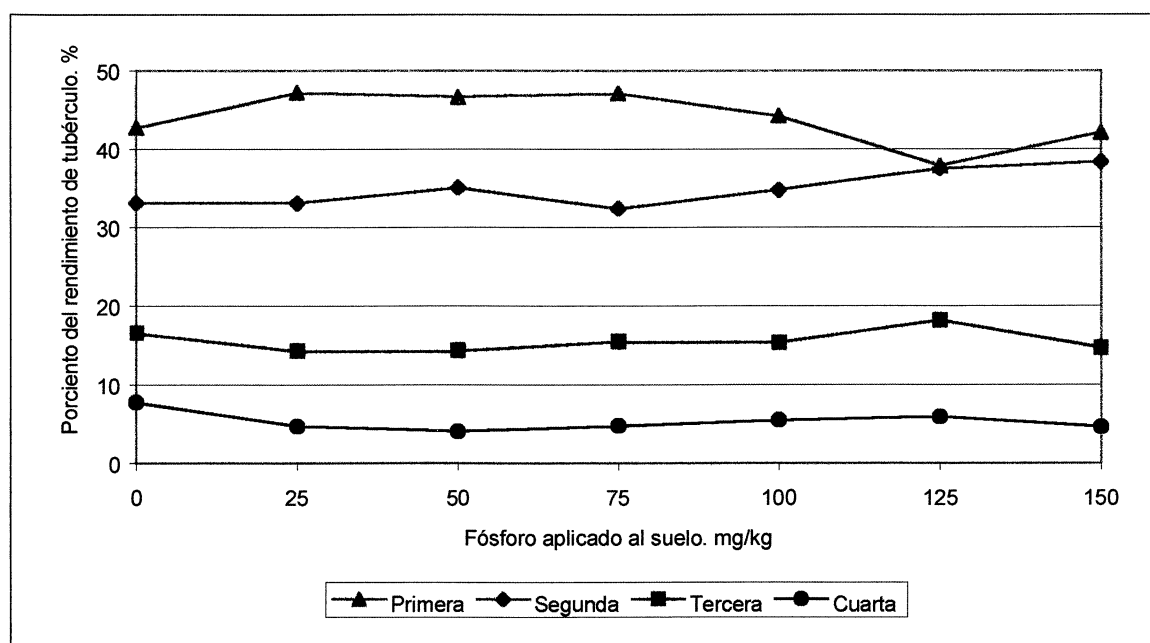


Figura 4.19. Porcentaje de tubérculo de primera, segunda, tercera y cuarta con respecto al rendimiento total y en función de los niveles de fósforo aplicados. Expresado en por ciento (%). Rancho el Bayonero.

En el Cuadro 4.30., se presentan los porcentajes de rendimiento de papa de primera, segunda, tercera y cuarta, con respecto al rendimiento total en cada uno de los tratamientos. Aquí se muestra que el más alto porcentaje en papa de primera es 47.593 por ciento que corresponde al tratamiento dos (25 mg de P kg⁻¹), mientras que el más bajo corresponde al tratamiento seis (125 mg de P kg⁻¹) con 38.073 por ciento. En papa de segunda el porcentaje mayor

corresponde al tratamiento siete (150 mg de P kg⁻¹) con 38.473 por ciento y el más bajo con 32.503 por ciento en el tratamiento cuatro. El tratamiento seis (125 mg de P kg⁻¹) genera los más altos porcentajes de rendimiento con 18.306 y 5.923 por ciento y el tratamiento tres los más bajos porcentajes de rendimiento en las categorías de papas de tercera y cuarta, respectivamente.

Cuadro 4.30. Rendimiento total de tubérculo y la fracción porcentual de papa de primera, segunda, tercera y cuarta.

Fósforo mg·kg ⁻¹	Rend. total de papa ton ha ⁻¹	Papa de primera (%)	Papa de segunda (%)	Papa de tercera (%)	Papa de cuarta (%)
T1: 0	27.368	42.664	34.842	16.906	5.586
T2: 25	32.288	47.593*	33.331	14.367*	4.707
T3: 50	32.633	46.638	35.034	14.299	4.026*
T4: 75	31.175	47.259	32.503*	15.522	4.715
T5: 100	30.226	44.332	34.857	15.347	5.442
T6: 125	28.700	38.073*	37.696	18.306*	5.923*
T7: 150	29.940	42.187	38.473*	14.732	4.605

El Cuadro 4.31., muestra la fracción porcentual en orden descendente de tubérculo de primera, segunda, tercera y cuarta, además se indican los números de los tratamientos que permiten relacionar éstos con los mejores porcentajes de rendimiento por categoría de tubérculo. Se observa que el tratamiento dos y el siete ofrecen las mayores fracciones porcentuales en rendimiento de papa de primera y segunda, respectivamente. Mientras que el tratamiento seis ofreció los mejores resultados para papa de tercera y cuarta.

Cuadro 4.31. Rendimiento total de tubérculo en ton ha^{-1} , fracción porcentual de papa de primera, segunda, tercera y cuarta en orden descendente y el número de tratamiento. Rancho el Bayonero

Rendimiento total de papa		Papa de primera		Papa de segunda		Papa de tercera		Papa de cuarta	
T	ton ha^{-1}	T	(%)	T	(%)	T	(%)	T	(%)
3	32.633	2	47.593	7	38.473	6	18.306	6	5.923
2	32.288	4	47.259	6	37.696	1	16.906	1	5.586
4	31.175	3	46.638	3	35.034	4	15.522	5	5.442
5	30.226	5	44.332	5	34.857	5	15.347	4	4.715
7	29.940	1	42.664	1	34.842	7	14.732	2	4.707
6	28.700	7	42.187	2	33.331	2	14.367	7	4.605
1	27.368	6	38.073	4	32.503	3	14.299	3	4.026

La Figura 4.20., muestra el rendimiento total de tubérculo expresado en toneladas por hectárea, aquí se observa que los tratamientos tres, dos y cuatro generan rendimientos de 32.633, 32.288 y 31.175 ton ha^{-1} , respectivamente, los cuales superan a la media general. Entre los rendimientos del tratamiento tres y el testigo se establece una diferencia de 5.265 ton ha^{-1} . Los tratamientos con los niveles más altos de fósforo con 100, 125 y 150 mg de P kg^{-1} ofrecen rendimientos inferiores a la media general de 30.332 ton ha^{-1} . Desde el tratamiento tres hasta el tratamiento seis hay una clara caída del rendimiento total de tubérculo de 3.9 ton ha^{-1} . Otra situación es que todos los tratamiento son superiores al tratamiento testigo.

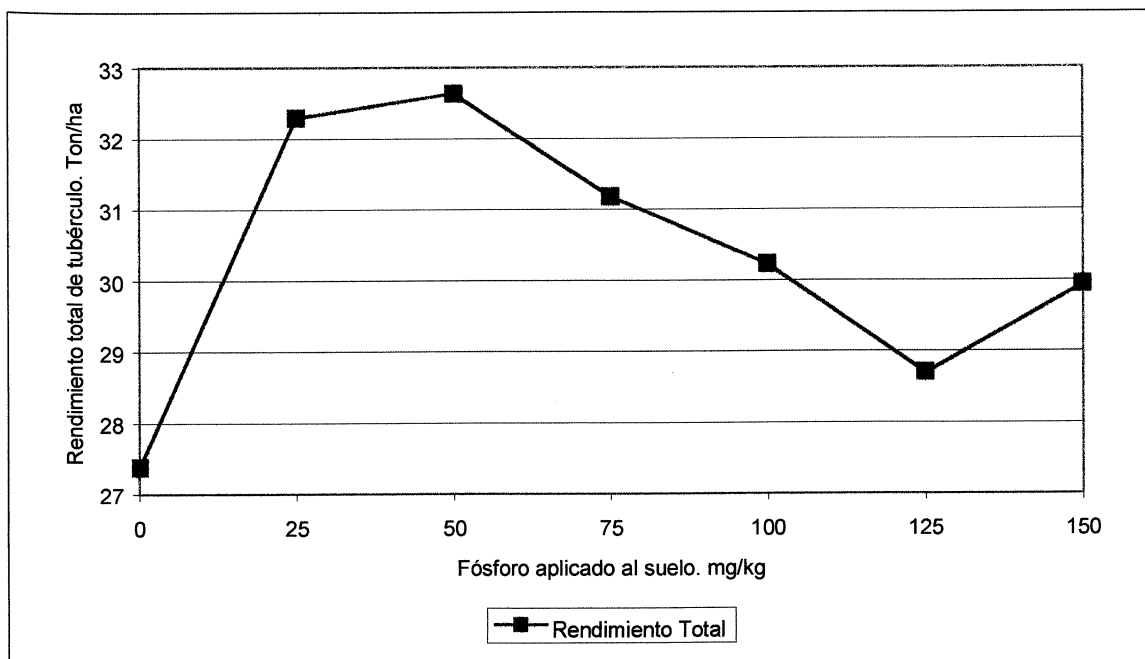


Figura 4.20. Rendimiento de tubérculo total en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

Desde un punto de vista económico el producto de mayor aceptación en el mercado es la papa de primera. En la Figura 4.21., se muestran los diferentes rendimientos de papa de primera, aquí los tratamientos dos, tres y cuatro superan a la media con rendimientos de 15.367 , 15.220 y $14.733 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente. La diferencia entre el mayor y el menor rendimiento es de $4.440 \text{ ton ha}^{-1}$. Se observa que los tratamientos cinco, seis y siete con 100 , 125 y $150 \text{ mg de P kg}^{-1}$, respectivamente, ofrecen rendimientos inferiores a la media de $13.462 \text{ ton ha}^{-1}$.

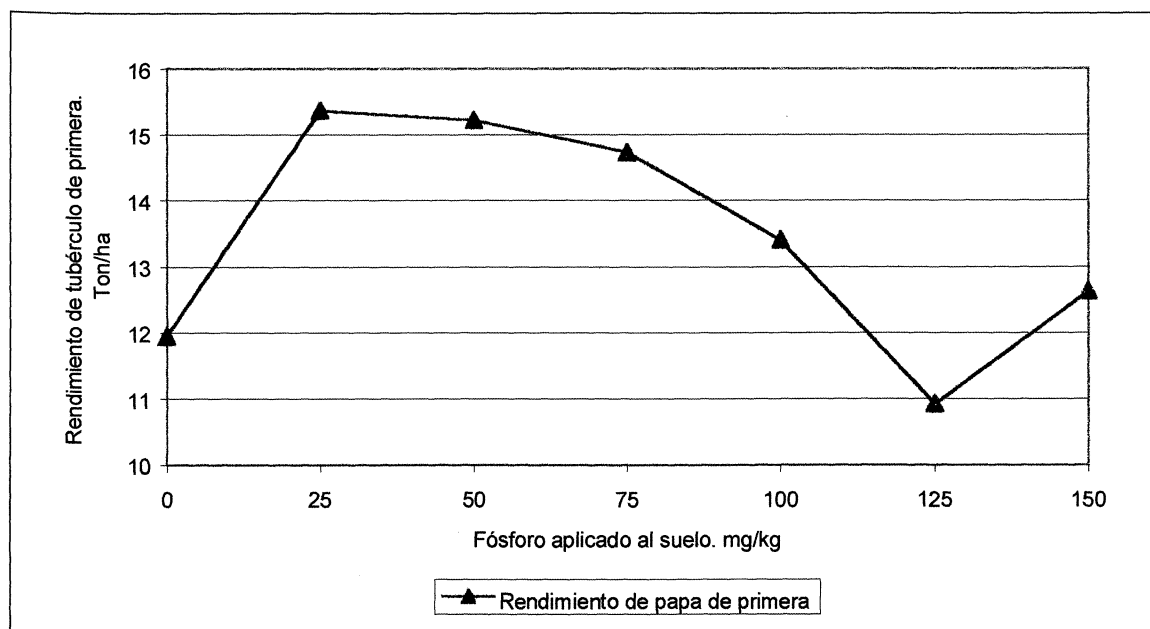


Figura 4.21. Rendimiento de tubérculo de primera en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

La Figura 4.22., muestra los rendimientos de papa de segunda los cuales fluctúan desde 9.262 a $11.519 \text{ ton ha}^{-1}$, para los tratamientos uno (testigo) y siete ($150 \text{ mg de P kg}^{-1}$), respectivamente. Los tratamientos siete, tres, seis y dos producen rendimientos de papa de segunda que superan a la media de $10.637 \text{ ton ha}^{-1}$, mientras que los rendimientos de los tratamientos cinco, cuatro y el testigo no lo logran. La diferencia entre el mayor y el menor rendimiento es de $2.257 \text{ ton ha}^{-1}$.

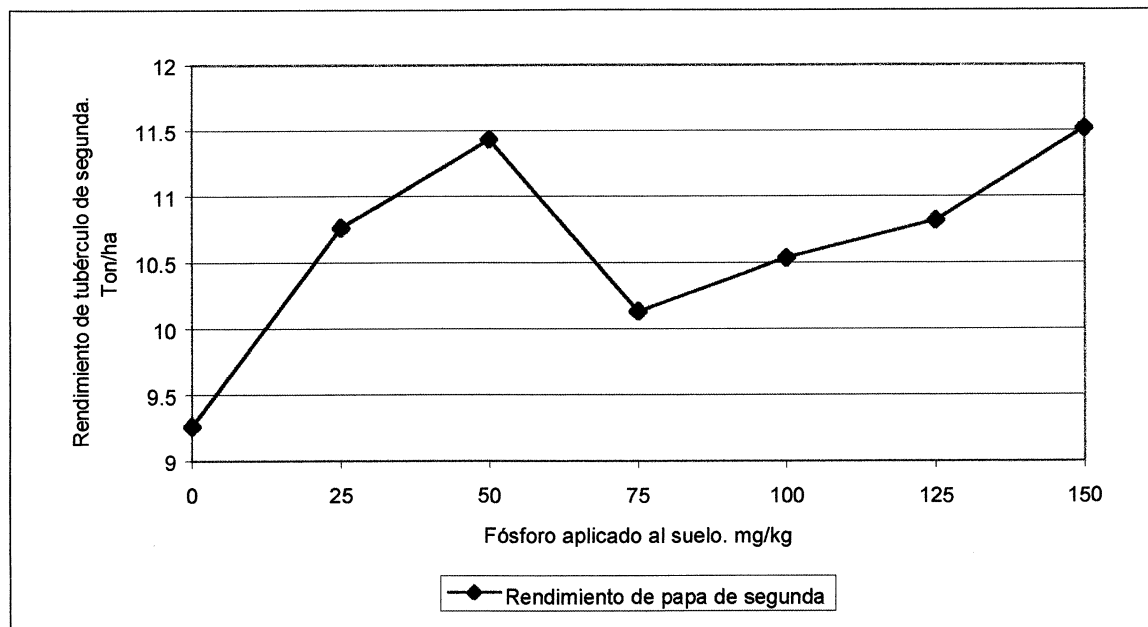


Figura 4.22. Rendimiento de tubérculo de segunda en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

La distribución de los rendimientos de tubérculo de primera y segunda con respecto al rendimiento total de papa, se muestra en la Figura 4.23. Aquí se observa que todos los rendimientos de los tratamientos superan aquel del testigo y la suma de los rendimientos de ambas categorías de papa superan las 23 ton ha^{-1} en todos los tratamientos, a excepción del testigo y el tratamiento seis con valores de 21.212 y $21.746 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente.

En la Figura 4.24. se observa que la suma de las fracciones porcentuales de los rendimientos de papa de primera y segunda de los tratamientos dos, tres y siete superan el 80 por ciento del rendimiento total. Solamente la suma de las fracciones porcentuales en ambas categorías del tratamiento seis es superada por el valor del testigo.

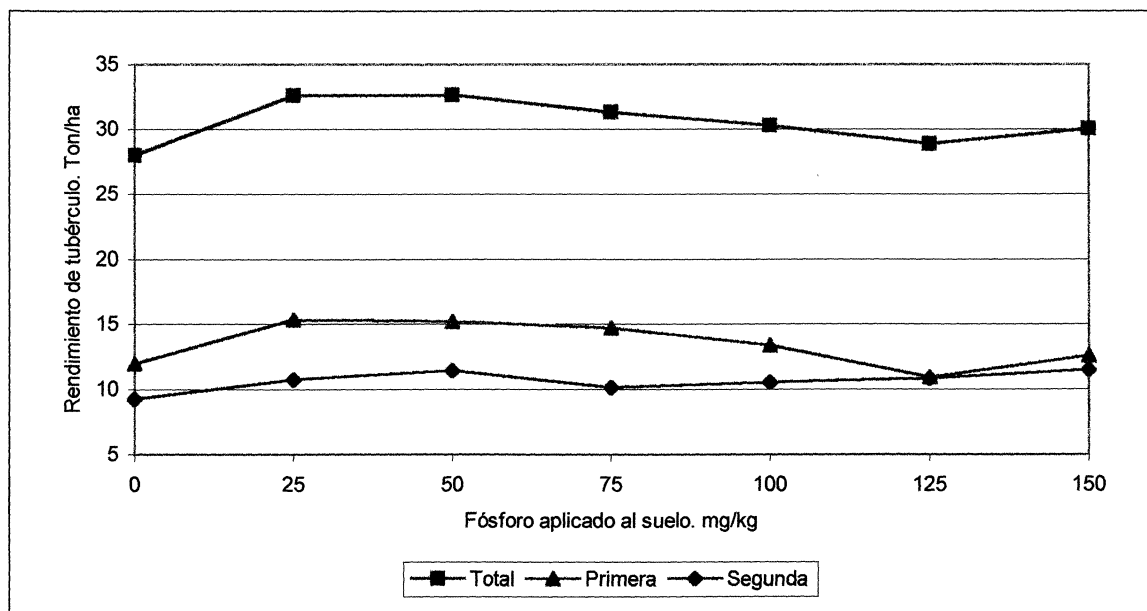


Figura 4.23. Distribución de los rendimientos de tubérculo de primera y segunda con respecto al rendimiento total en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

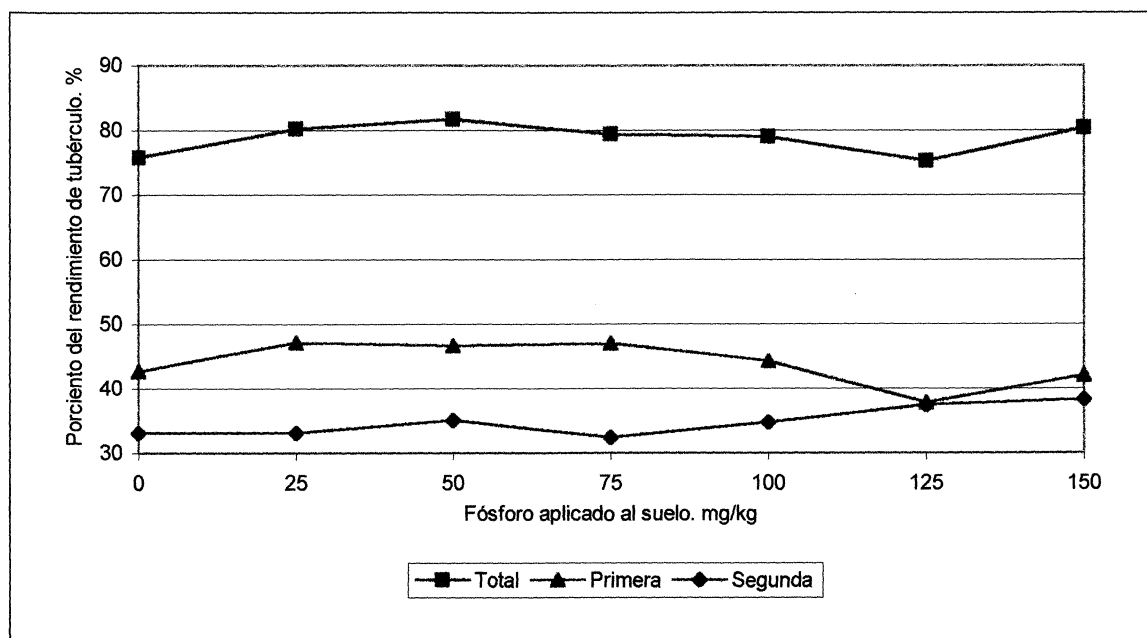


Figura 4.24. Porcentaje de los rendimientos de tubérculo de primera y segunda y la suma de ambas fracciones porcentuales en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. Rancho el Bayonero.

En el Cuadro 4.32. se muestra la suma de los porcentajes de los rendimientos de papa de primera y segunda, se observa que las sumas de ambos rendimientos producen porcentajes que van desde 75.20 hasta 81.67 por ciento, esto indica que los tratamientos intermedios dos, tres y cuatro producen rendimientos que alcanzan un alto nivel del rendimiento total. Es decir, que la suma de los rendimientos de papa de primera y segunda prácticamente es el 80 por ciento del rendimiento total, siendo estos tamaños de papa los de mayor importancia económica en el mercado, Figura 4.24.

Cuadro 4.32. Rendimiento total de tubérculo en ton ha⁻¹, suma de los rendimientos de papa de primera y segunda y suma de los rendimientos de papa de tercera y cuarta. Fracciones porcentuales de ambas sumas. Rancho el Bayonero

Fósforo mg·kg ⁻¹	Rend. de papa (total)	Suma Rend. papa 1 y 2 ton ha ⁻¹	Suma Rend. papa 1 y 2 (%)	Suma Rend. papa 3 y 4 ton ha ⁻¹	Suma Rend. papa 3 y 4 (%)
0	27.368	21.212	77.50	6.156	22.50
25	32.288	26.129	80.92	6.159	19.08
50	32.633	26.653	81.67 *	5.980	18.33
75	31.175	24.866	79.76	6.309	20.24
100	30.226	23.942	79.20	6.284	20.80
125	28.700	21.746	75.77	6.954	24.23 *
150	29.940	24.150	80.66	5.790	19.34

En las Figuras 4.25. y 4.26., se observa el rendimiento de papa de tercera y cuarta donde el tratamiento seis (125 mg de P kg⁻¹) produce los más altos rendimientos de papa en estas categorías. En la clasificación de papa de

tercera solamente los tratamientos seis y cuatro superaron a la media con rendimientos de 5.254 y 4.839 ton ha⁻¹, respectivamente. Mientras que en papa de cuarta los tratamientos seis, cinco, uno y dos superaron a la media con rendimientos de 1.700, 1.645, 1.529 y 1.520 ton ha⁻¹, respectivamente.

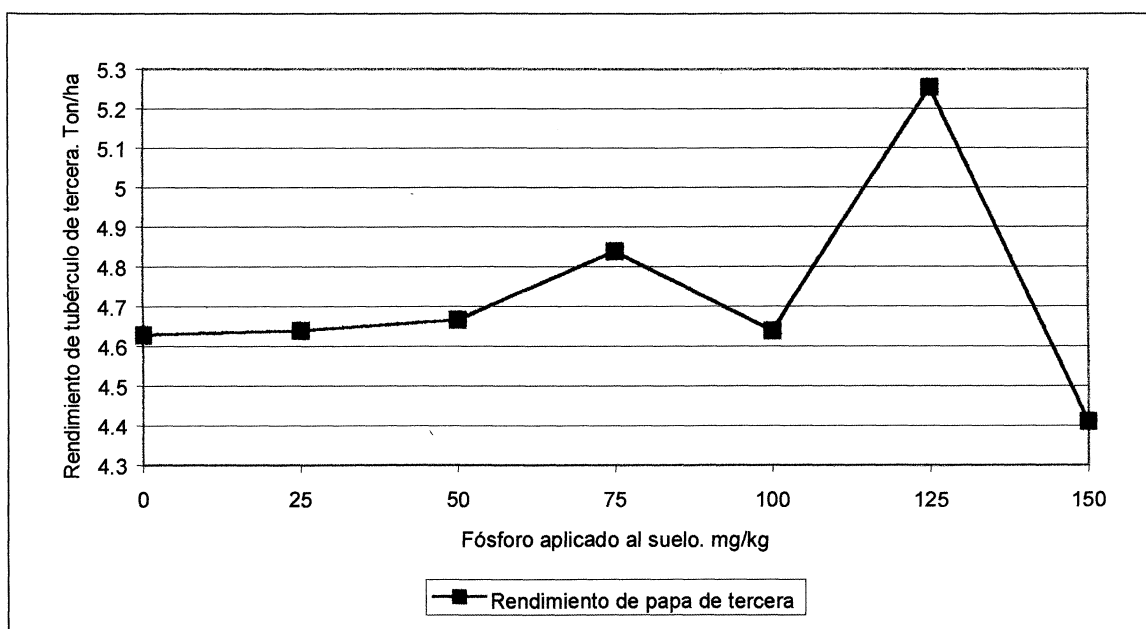


Figura 4.25. Rendimiento de tubérculo de tercera en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. ton·ha⁻¹. Rancho el Bayonero.

La distribución de los rendimientos de tubérculo de tercera y cuarta con respecto al rendimiento total de papa, se muestra en la Figura 4.27. Se observa que la suma de ambas categorías de papa en los tratamientos dos, tres y cuatro son los que generan rendimientos de alrededor del 20 por ciento del total de la producción de papa en cada tratamiento, Figura 4.28.

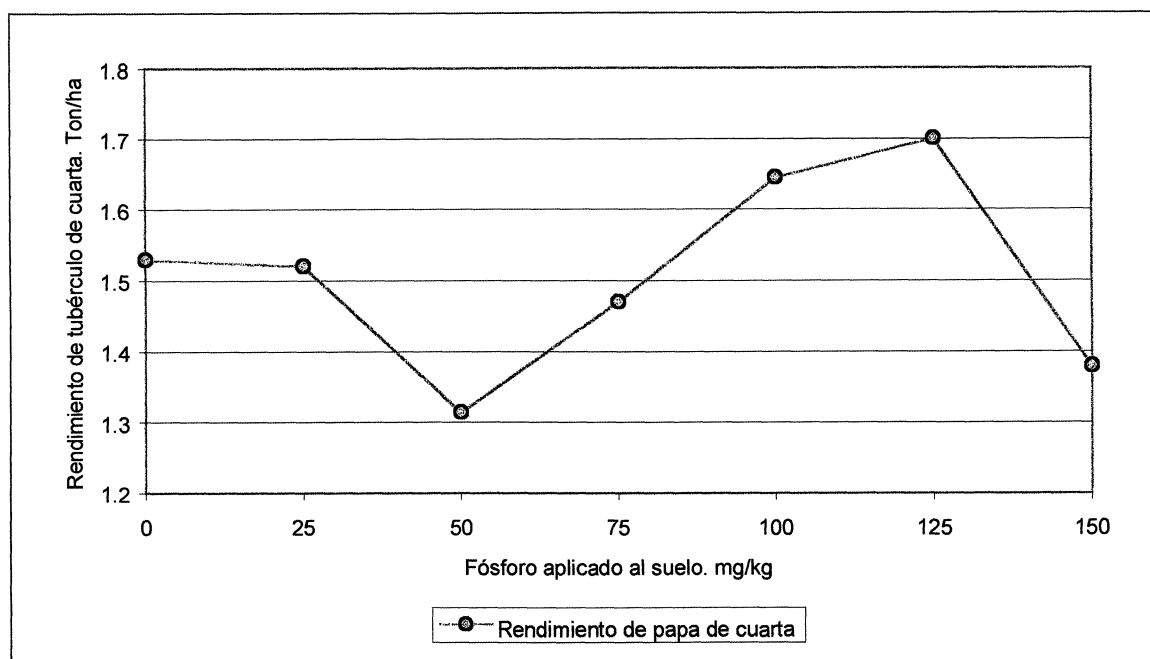


Figura 4.26. Rendimiento de tubérculo de cuarta en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

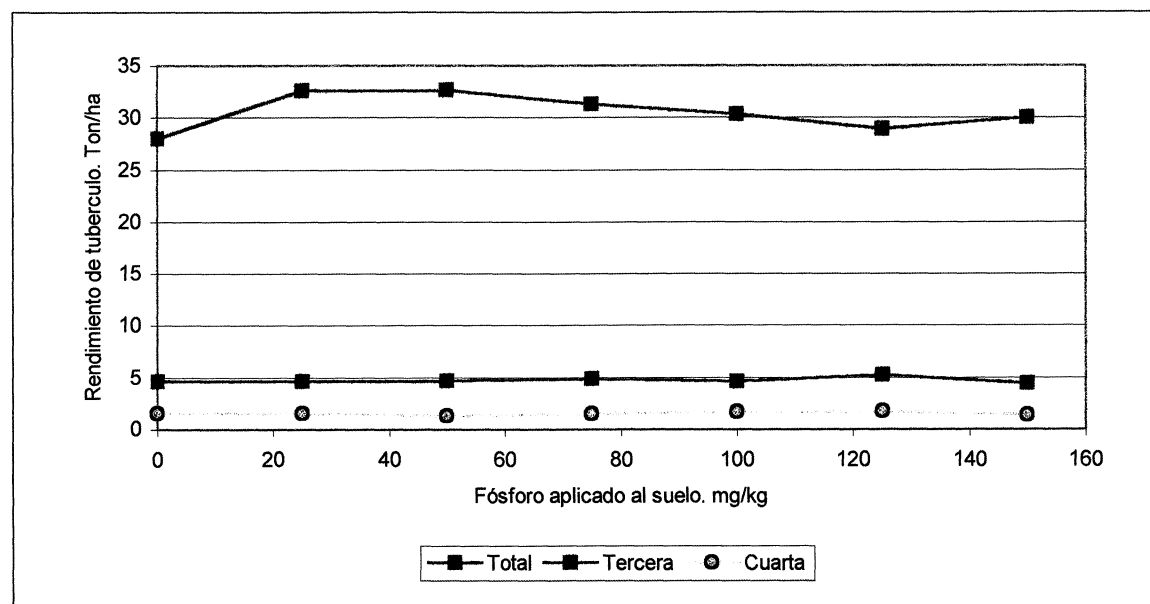


Figura 4.27. Distribución de los rendimientos de tubérculo de tercera y cuarta con respecto al rendimiento total en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Rancho el Bayonero.

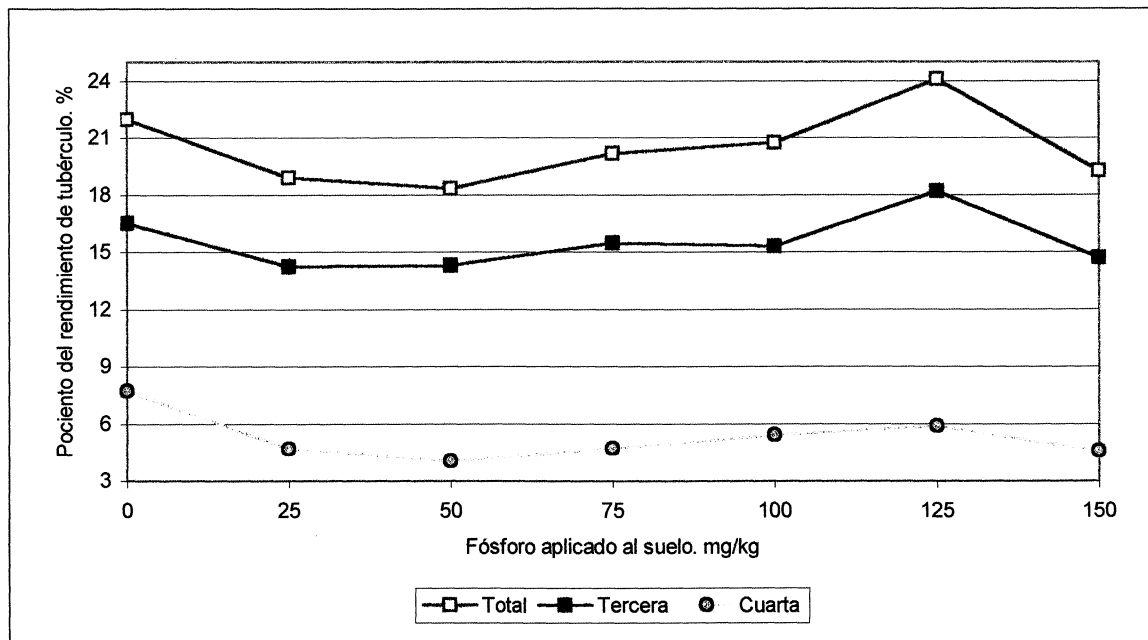


Figura 4.28. Porcentaje de los rendimientos de tubérculo de tercera y cuarta y la suma de ambas fracciones porcentuales en función de los niveles de fósforo aplicado al suelo. Rancho el Bayonero.

Los tratamientos con las más altas concentraciones de fósforo producen los mejores rendimientos en papa de tercera y cuarta, de importancia industrial en la producción de frituras y diversos complementos alimenticios, así como de importancia para el productor ya que este producto se utiliza como semilla en el siguiente ciclo agrícola. El Cuadro 4.32., muestra la suma de los rendimientos de papa de tercera y cuarta, los cuales generan porcentajes de rendimiento que fluctúan desde 18.33 a 24.23 por ciento, lo que significa que los tratamientos no producen ni la cuarta parte de los rendimientos totales de papa de tercera y cuarta, por el contrario éstos producen niveles muy aceptables de rendimiento de papa de primera y de segunda.

CONCLUSIONES

- ◆ Los valores de fósforo en solución obtenidos en los cuatro suelos en estudio, por el método de Van der Paauw son descritos adecuadamente por las isothermas de adsorción de Langmuir y de Temkin. Mientras que aquellos valores que se obtienen a partir del método de Fox y Kamprath solamente son descritos por la isoterma de adsorción de Temkin. Adicionalmente, la isoterma de Langmuir permitió el calculo de los valores de la capacidad máxima de adsorción de fósforo (b) y la constante de energía de retención de fósforo (k).
- ◆ Con la isoterma de adsorción de Langmuir se encontró que la capacidad máxima de adsorción de fósforo (b) sigue el orden de: Potrero > Bayonero > Venado > Erial, con valores de 294.12, 256.41, 147.06 y 31.45 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.
- ◆ Con la isoterma de adsorción de Langmuir se encontró que la constante de energía de retención de fósforo (k) sigue el orden de: Erial > Venado > Bayonero > Potrero, con valores de 4.8922, 1.1526, 0.8864, 0.7234.
- ◆ La Isoterma de adsorción de Temkin permitió calcular la capacidad amortiguadora de fosfatos en el suelo y se estableció de acuerdo al orden:

Erial > Venado > Potrero > Bayonero con valores de: 1801, 768.035, 612.776 y 524.601, respectivamente.

- ◆ Las relaciones de desorción de fósforo son descritas adecuadamente por los modelos Logarítmicos, mientras que los modelos lineales y exponenciales mostraron baja confiabilidad. Utilizando el método de Van der Paauw, las curvas de desorción establecen que el grado de liberación de fósforo de los suelos es acorde al orden: Potrero > Bayonero > Venado > Erial. Diferente es el comportamiento por el método de Fox y kamprath, ya que las curvas de desorción establecen que el grado de liberación de fósforo de los suelos sigue el orden: Bayonero > Potrero > Venado > Erial.

- ◆ Los suelos del Bayonero, Venado, Potrero y Erial presentan diferente capacidad de adsorción y desorción de fósforo, así como diferente producción de biomasa en el cultivo de papa con la aplicación de distintos dosis de fósforo. En el suelo del Potrero, se encontró la mejor capacidad de fijación de fósforo, mientras que la desorción de fósforo esta en función del método de extracción empleado.

- ◆ En la investigación del invernadero, los más altos rendimientos de tubérculo se encuentran con los tratamientos aplicados de 150 mg de P kg⁻¹ en el suelo del Bayonero, 75 mg de P kg⁻¹ en los suelos del Erial y el Venado y 25 mg de P kg⁻¹ en el suelo del Potrero.

- ◆ En la investigación de campo en el rancho el Bayonero se establece que en rendimiento total de papa y los rendimientos de papa de primera, segunda, tercera y cuarta, los análisis estadísticos no muestran diferencias estadísticas significativas. Sin embargo, el tratamiento tres con $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ produce el mejor rendimiento de papa total.
- ◆ Es necesario hacer más investigación en el campo de la ciencia del suelo que coadyuve a lograr un uso más eficiente de la fertilización en general y de manera específica la fosfatada en la región papera de los estados de Coahuila y Nuevo León. A la par ampliar el conocimiento del manejo del ácido fosfórico como fuente de fósforo para fomentar su uso.

RESUMEN

Al norte de México en los suelos del sureste de Coahuila, existe un problema relacionado con la fertilización fosfatada, ya que los productores del cultivo de papa al utilizar métodos tradicionales de fertilización aplican grandes cantidades de fósforo con eficiencias entre el quince y el diez y ocho por ciento, lo que propicia un alto costo en la producción del cultivo.

Los factores Intensidad, Cantidad, Capacidad y Movilidad caracterizan la habilidad de un suelo para proveer a las plantas con nutrimentos en la forma, cantidad y tiempo en que son requeridos; la cantidad de un elemento que esta adsorbido a los coloides del suelo o desorbido de éstos es el factor Cantidad y la concentración del elemento en la solución del suelo es el factor Intensidad.

La relación entre la Cantidad y la Intensidad (Q/I) en el estudio del fósforo del suelo, describe la capacidad del suelo para fijar o liberar el fósforo de los coloides del suelo. Las relación de adsorción de fósforo de los suelos se utiliza para determinar el requerimiento del fósforo para producir cultivos e inferir la habilidad del suelo para suplementar fósforo y las relaciones de desorción de fósforo se aplican para fines de nutrición vegetal y evaluar su dinámica en suelos.

Se desarrollo una investigación durante los años 1997 y 1998, que comprendió actividades de laboratorio, invernadero y campo.

En la investigación del laboratorio se hizo uso de dos métodos de extracción y de las isothermas de adsorción de Langmuir y Temkin para determinar la adsorción del fósforo en cuatro suelos calcáreos y en la desorción del fósforo se utilizó los mismos métodos de extracción y los resultados se describieron por medio de modelos matemáticos.

En la investigación de invernadero se probaron siete niveles de fósforo en un diseño completamente al azar y cuatro repeticiones, se evaluaron nueve variables en planta y noventa días después de la siembra se cosechó. El análisis estadístico mostró que en número de tubérculos cosechados, número de tallos y número de pecíolos promedio por planta no se encontró diferencias estadísticas significativas en los cuatro suelos. En altura y peso seco de planta en el suelo del Erial y peso total de tubérculo en el suelo del Potrero se encontró diferencias altamente significativas. En peso promedio y diámetro polar de tubérculo en el suelo del Bayonero solo se encontró diferencias significativas, pero en los suelos del Venado, Potrero y Erial diferencias altamente significativas. En diámetro ecuatorial de tubérculo se encontró diferencias altamente significativas en los suelos del Venado, Potrero y Erial.

El experimento de campo se efectuó en el suelo del rancho el Bayonero. Se probaron siete tratamientos en un diseño de bloques al azar con

cuatro repeticiones. Se utilizó como fuente de fósforo el ácido fosfórico y se aplicó a través de un sistema de fertirrigación. El sistema de análisis estadístico (SAS), se utilizó para analizar los datos del rendimiento.

Económicamente, el producto de mayor aceptación en el mercado es la papa de primera y los tratamientos dos, tres y cuatro superan a la media con rendimientos de 15.367, 15.220 y 14.733 ton ha⁻¹, respectivamente. Se observó que los tratamientos con las más altas concentraciones de fósforo producen los mejores rendimientos en papa de segunda, tercera y cuarta, de importancia industrial y en su defecto de uso como semilla por el productor.

De manera general, se observa que las dosis bajas de fósforo aplicadas al cultivo en el suelo del Bayonero producen los valores mas altos de producción de tubérculo.

LITERATURA CITADA

- Abrams M. M. and Jarrell W. M., 1992. Bioavailability index for phosphorus using ion exchange resin impregnated membranes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1532 - 1537.
- Agbenin J. O. and Tiesen H., 1995. Phosphorus sorption at field capacity and soil ionic strength: kinetics and transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 998 - 1005.
- Amer F., Bouldin D. R., Black C. A., Ducke F. R., 1955. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P 32 - equilibration. *Plant and Soil*. VI, No. 4: 391 - 408.
- Bache, B. W. 1964. Aluminum and iron phosphate studies relating to soils. II. Reactions between phosphate and hydrous oxides. *J. Soil Sci.* 15:110-116.
- Bache, B. W., and E. G. Williams. 1971. A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci.* 22: 289-301.
- Barber, S.A. 1984. *Soil nutrient bioavailability*. John Wiley and Sons, New York.
- Bidwell R., G. S. 1979. *Fisiología vegetal*. AGT Editor. México., p: 281.
- Black, C. A. 1968. *Soil plant relationships*. 2a Ed. John Wiley and Sons. New York, USA., p: 401.
- Blanchar, R.W., and A.C. Caldwell. 1964. Phosphorus uptake by plants and readily extractable phosphorus in soils. *Agron. J.* 56: 218- 221.
- Blasco, L.M. 1974. El fósforo orgánico y su metabolismo en los suelos. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* 6 (1): 19-43.
- Bornemisza, E., Fassbender, H.W. 1970. Uptake of fertilizer phosphate from nine soils from the humid tropics. *Agroquímica* 14 (2-3): 259-268.
- Buckman, H.O., y C.N. Brady. 1966. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. 1ª. Ed. Montaner y Simon. España., p 450-475.

- Cajuste, L.J. 1977. Química de suelos con un enfoque agrícola. CP. Chapingo, México. p. 211-219. Cepeda Dovala., J.M. 1983. Química de suelos U.A.A. "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila, México., p: 76-111.
- Chai, C.M., and A. C. Caldwell. 1959. Forms of phosphorus and fixation in soil. Soil Sci. Soc. Proc. Minnesota. U.S.A., p: 458-460.
- Chang, S.C. y Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science 84: 134-144.
- Colé, C. V., S. R. Olsen, and C. O. Scott. 1953. The nature of phosphate sorption by calcium carbonate. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17:352-356.
- Cooperband L. R. And Logan T. J., 1994. Measuring in situ changes labile soil phosphorus with anion exchange membranes. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 105-114.
- Cuesta R. M., Ramon A. M., Lucena J. J., y Garate A. 1987. Dinámica del fósforo en un suelo calizo. II. Comparación de dos ritmos de abonado fosfórico y su incidencia en un cultivo de tomate. Anales de Edafología y Agrobiología. 46: 11-12, 1351-1359.
- Dalal, R.C. 1977. Soil organic phosphorus. Advanced in Agronomy. 29: 83-117.
- De Melo J.W.V., Barrón V., and Torrent J. 1998. Phosphorus and iron mobilization in flooded soils from Brazil. Soil Sci. Vol.163. No. 2: 122-132.
- Ellis B. G. y B. D. Knezek. 1983. Reacciones de adsorción de los micronutrientes en suelos. Mortvedt, J. J., Giordano, P. M., Lindsay, W. L. Micronutrientes en Agricultura. AGT Editor. México.
- Elrashidi M. A., Van Diest A and El-Damaty A. H., 1975. Phosphorus determination in highly calcareous soils by the use of an anion exchange resin. Plant and Soil. 42: 273 - 286.
- Fassbender, H.W. 1969. Retención y transformación de fosfatos en ocho Latosoles de la Amazonia del Brasil. Fitotecnia Latinoamericana. 6 (1):1-9.
- Fassbender, H.W. 1980. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Ed. IICA. San José, Costa Rica., p 271-281.
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. 1994. Química de suelos., con énfasis en suelos de América Latina. 1ª Reimpresión. Serv. editorial IICA. San José, Costa Rica.

- Fernandez, M.L.V. 1991. Aspects of the status and dynamics of phosphorus in the Ap horizon of various soils north of the Tagus. 4. Adsorption curves. *Revista de Ciencias Agrarias*. 14: 2, 39-66.
- Fitter, A. H., and C. D. Sutton. 1975. The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *J. Soil Sci.* 26:241-246.
- Foth, D. H. 1978. *Fundamentals of soil*. 6a Ed. John Wiley and Sons. New York, USA., p: 220.
- Fox, R. L. 1981. External phosphorus requirements of crops. In Stelly, M. (Ed.) *Chemistry in the soil environment*. Am. Soc. Agron.; Soil Sci. Soc. of America. Madison, Wisconsin, USA., p: 223-239.
- García F., J. L., y R. García del C. 1982. *Edafología y fertilización agrícola*. 1ª. Ed. AEDOS. España., p: 21-53.
- Gunary, D. 1970. A new adsorption isotherm for phosphate in soil. *Journal Soil Sci.* 21:72-77.
- Gunary, D., and C.D. Sutton. 1967. Soil factors effecting plant uptake of phosphate. *Journal Soil Sci.* 18: 167-173.
- Gunnarsson, O. 1987. Long-term dynamics of phosphorus in soil illustrated by means of soil analyses from long term fertility experiments. *Kungl Skogsoch Lantbruksakademiens Tidskrift.*, No. 19, Supplement, 71-92.
- Holford, I.C.R. 1976. Effects of phosphate buffer capacity of soil on the phosphate requirements of plants. *Plants and Soil*. 45: 433-444.
- Holford, I.C.R., and G.E.G. Mattingly. 1976. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. *Plant and Soil*. 44: 377-389.
- Houng, K. H., y D. Y. Lee, 1998. Comparisons of linear and nonlinear Langmuir and Freundlich curve-fit in the study of Cu, Cd and Pb adsorption on Taiwán soils. *Soil Science*. Vol. 163.No. 2: 115-121.
- Hsu, P. H. 1965 Fixation of phosphate by aluminum and iron in acidic soils. *Soil Science*. 99: 398-402.
- Iyamuremye F., Dick R. P., and Baham J. 1996. Organic amendments and phosphorus dynamics: III. Phosphorus speciation. *Soil Sci.* 161: 7, 444-451.
- Khasawneh, F. E. 1971. Solution ion activity and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 426-436.

- Kuo, S., and D.S. Mikkelsen. 1979. Effect of magnesium on phosphate adsorption by calcium carbonate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 127(2): 65-69.
- Larsen, S. 1967. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy.* 19; 151-210.
- Luque T., y Arambarri P. de.1983. Dinámica del fósforo en los suelos de las marismas del río Guadalquivir. *Anales de Edafología y Agrobiología.* 42: 9-10. 1723-1735.
- Massee T. W., Olsen R. A. and Skogley E. O.,1977. Characterizing soil fertility by ion diffusive flux measurements. *Plant and Soil.* 47: 663 - 679.
- Mengel, K. and A. Kirkby. 1982. principles of plant nutrition, 2nd. Ed. Editors International Potash Institute. p. 347-360.
- Oberson A., Fardeau J.C., Besson J.M., and Sticher H. 1993. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biology and Fertility of Soils.* 16:2,111-117.
- Olsen, S. R., and F.S. Watanabe. 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, p:144 -149.
- Olsen, S.R., R.A. Bowman, and F.S. Watanabe. 1977. Behavior of phosphorus in the soil and interactions with other nutrients. *Phosphorus Agricultural.* 70:31-46.
- Ortega T., E. 1970. Notas del curso de química de suelos. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México., p: 40-65.
- Ortega, T. E. 1981. Química de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. México., p: 241-269; 383-386.
- Ortiz, V.B., y S.A. Ortiz. 1984. Edafología. U.A.CH. Chapingo. México p. 155-157.
- Parfitt, R. L., R. J. Atkinson, and R. St. C. Smart. 1975. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:837-841.
- Peters M., Blume H. P., Gompel H., and Sattelmacher B. 1990. Nutrient dynamics and balance of two podzols under conventional and biological cultivation. *Journal of Agronomy and Crop Science.*, 165: 5, 289-296.
- Raven, K. P. and Hossner, L. R. 1993. Phosphorus desorption quantity - intensity relationships in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal.* 57: 1501 - 1508.

- Raven, K. P. and Hossner, L. R. 1994. Sorption and desorption quantity - intensity parameters related to plant-available soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. 58: 405 - 410.
- Raven, K. P. and Hossner, L. R. 1994. Soil phosphorus desorption kinetics and relationship with plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. 58: 416 - 423.
- Rojas G., M. 1972. *Fisiología vegetal aplicada*. 2^a Ed. Editorial Mc. Graw-Hill. México., p: 26-36.
- Russell, J.E. 1961. *Soil conditions and plant growth*. 9a. ed. Longman. Great Britain., p: 532.
- Sample, E.C., R.J. Soper, and G.J. Racz. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils., p 263-310. In F.E. Khasawneh et al. (Ed.) *The role of phosphorus in agriculture*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Sharpley, A.N., Singh U., Uehara G., and Kimble J. 1989. Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. Vol: 53: 1, 153-158.
- Shaviv, A; Schnek, M. 1989. Reactions of mixtures of granulated superphosphate and ammonium sulphate in calcareous soil. *Geoderma*. 44: 1, 17-27.
- Sibbesen E., 1977 . A simple ion-exchange resin procedure for extracting plant-available elements from soil. *Plant and Soil*. 46: 665 - 669.
- Sibbesen E., 1978. An investigation of the anion-exchange resin method for soil phosphate extraction. *Plant and Soil*. 50: 305 - 321.
- Sinclair, A. G., and Johnstone, P. D. 1995. Ability of a dynamic model of phosphorus to account for observed patterns of response in a series of phosphate fertilizer trials on pasture. *Fertilizer Research*. 40: 1, 21-29.
- Smeck, N.E. 1985. Phosphorus dynamics in soil and landscapes. *Geoderma*. 36: 185-199.
- Sofyan, A., and Vanderdeelen, J., 1995. Evolution of residual phosphate in selected Belgian soils under uncropped long-term condition: I. pH dynamics on calcareous and acidic soils. *Indonesian Journal of Crop Science*. 10: 2, 33-44.
- Steffens D., 1994. Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. 58: 1702 - 1708.

- Stewart J.W.B., and Sharpley A.N. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. SSSA Special Publication. Soil Sci. Soc. Am. No. 19: 101-121.
- Syers, J. K., M. G. Browman, G. W. Smillie, and R. B. Corey. 1973. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37:358-363.
- Thibaud Erkey, C., G. Yang., E. Can., and A. Aydin. 1996. Mathematical modeling of adsorption and desorption of volatile contaminants from soil: influence of isotherm shape on adsorption and desorption profiles. Texas A&M University, College Station. Environment Science Technology. Vol. 30, no. 7, pp. 2127-2134. TX, USA.
- Thien S.J., and Myers R. Determination of bioavailable phosphorus in soil. 1992. Soil Sci. Soc. Am. Journal. 56: 3, 814-818.
- Thompson, L.M., y F.R. Troeh. 1980. Los suelos y su fertilidad. 4ª Ed. Editorial Reverte S.A. Barcelona, España., p 331-360
- Thomson, M.L., and R.T. Frederick. 1978. Soil and fertility. 4a Ed. Mc. Graw-Hill. New York., p 197.
- Tisdale, S.L, y W.L. Nelson. 1982. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. 1ª Edición. UTEHA. México., p: 277-285.
- Tsai, Wen Tien.; Chang, Ching Yuan.; Lee, Horng Chia. 1996. Adsorption of organic vapors containing N,N-dimethylformamide on activated. Chia Nan Jr. Coll of Pharmacy, Tainan, Taiwan. Journal Environment Science Health, Part A. Vol. 31, no. 5, pp. 995-1008. Monticello, NY.
- Vanderdeelen J. 1995. Phosphate immobilisation in an uncropped field experiment on a calcareous soil. Plant and Soil., 171: 2, 209-215.
- Vazquez, M. E., Noellemeyer, E., Coremberg, P. 1991. The dynamics of different organic and inorganic phosphorus fractions in soils from the south of Santa Fe Province, Argentina. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 22: 11 y 12, 1151-1163.
- Wen Tien, Tsai; Ching Yuan, Chang; Horng Chia, Lee. 1996. Adsorption of organic vapors containing N,N-dimethylformamide on activated. Chia Nan Jr. Coll of Pharmacy, Tainan, Taiwan. Journal Environment Science Health, Part A. Vol. 31, no. 5, pp. 995-1008. Monticello, NY.
- Yli Halla M., Hartikainen H., Ekholm P., Turtola E., Puustinen M., and Kallio K. 1995. Assessment of soluble phosphorus load in surface runoff by soil analyses. Agriculture, Ecosystems and Environment. 56: 1. 53-62.

APENDICE

APÉNDICE

Transformación de los tratamientos expresados en partes por millón (ppm) a valores expresados en kilogramos de fósforo por hectárea (kg P·ha⁻¹) para el Rancho el Bayonero.

$$Da = 1.0693 \text{ g/cm}^3 ; Da = 1.0693 \text{ Ton/m}^3$$

Área de una hectárea.

$$A = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 10,000 \text{ m}^2$$

Volumen de suelo de una hectárea y un estrato de 30 cm.

$$V = 10,000 \text{ m}^2 \times 0.30 \text{ m} = 3000 \text{ m}^3$$

Peso del suelo de una hectárea:

1 m ³	-----	1.0693 ton
3000 m ³	-----	x = ?
		x = 3,207.9 ton
		x = 3'207,900 kg

Calculo para 25 ppm:

1 kg de Suelo	-----	25 mg de P
3'207,900 kg Suelo	-----	x = ?
		x = 80'197,500 mg P
		x = 80,197.5 g P
		x = 80.1975 kg P / ha

$$X = \frac{(3'207,900 \text{ kg de Suelo} \times 25 \text{ mg P}) \cdot (1 \text{ kg P})}{(1 \text{ kg de Suelo}) \cdot (1'000,000 \text{ mg P})}$$

$$X = (3.2079) \times 25 \text{ mg P}$$

$$X = 80.1975 \text{ kg P}$$

$$\text{Factor A} = 3.2079$$

Cualquier tratamiento expresado en ppm, puede ser transformado a kg de P por hectárea, solamente multiplicando la cantidad de fósforo en ppm por el Factor A.

Transformación de los tratamientos expresados en kg de P/ha a kilogramos de P_2O_5 por hectárea.

Peso molecular del P_2O_5

$$\begin{array}{rcl} O = & 15.9994 \times 5 = & 79.997 \\ P = & 30.9738 \times 2 = & \underline{61.9476} \\ & & 141.9446 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 141.9446 & \text{-----} & 100 \% \\ 61.9476 & \text{-----} & x = ? \\ & & x = 43.6421 \% P \end{array}$$

Calculo correspondiente a 25 ppm:

$$\begin{array}{rcl} 43.6421 \text{ kg P} & \text{-----} & 100 \text{ kg } P_2O_5 \\ 80.1975 \text{ kg P} & \text{-----} & x = ? \\ & & x = 183.7618 \text{ kg } P_2O_5 \end{array}$$

$$X = \frac{80.1975 \times 100}{43.6421} = 80.1975 \times (2.29137)$$

$$X = 183.7621 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ /ha}$$

$$\text{Factor B} = 2.29137$$

Cualquier tratamiento expresado en kg de P por hectárea, puede ser transformado a kg de P_2O_5 por hectárea, solamente multiplicando este valor por el Factor B.