

## **1 INTRODUCCIÓN**

Los programas de recomendaciones de fertilizantes tienen como principal propósito auxiliar a la toma de decisión de las medidas de aplicación de las mismas, para que, de esta manera esas aplicaciones se realicen o lleven a cabo un uso y manejo racional de los insumos en lo que refiere a cantidad, formas y época de aplicación, y en este sentido, llegar a condiciones que aumenten y mantengan los tenores de nutrientes en el suelo, optimizando de esta forma el retorno económico de los cultivos. Para lograr los objetivos propuestos durante este proceso, se debe seguir unas etapas, que son las siguientes: muestreo de suelo, análisis en laboratorio, interpretación de los resultados y al final la recomendación pertinente del fertilizante para una producción económica y ambientalmente sostenible.

En este sentido los productores del país vieron la necesidad de generar recomendaciones que se adapten a las condiciones actuales del país, donde para lograr ese objetivo se llevo a cabo un proyecto de investigación que fue realizado por varios años en las zonas o regiones más representativas del Paraguay, donde, en la misma fueron priorizados los cultivos de interés económico como la soja, maíz, trigo y girasol, destacando que los nutrientes evaluados en esta investigación fueron el nitrógeno, fósforo y potasio. El mencionado proyecto pudo llevarse a cabo gracias al convenio realizado con la Universidad Federal de Santa María (UFSC) RS Brasil, Cámara Paraguaya de Exportadores de Cereales y Oleaginosas (CAPECO), instituciones de investigación, cooperativas rurales productoras del Paraguay. Este esfuerzo realizado por la CAPECO, fue con el principal objetivo de dar respuestas a las preguntas de los productores, que demandan eficiencia y calidad en los resultados de los análisis de suelo y sus respectivas recomendaciones de los fertilizantes para los cultivos.

El convenio ha generado, aparte de la primera información del manejo y recomendación de fertilizantes para el Sistema de Siembra Directa del país, varias tesis de pós-gradados de profesionales paraguayos y brasileños donde se tienen; cuatro tesis de maestría (Cubilla, 2005; Wendling, 2005; Hahn, 2008, Fatecha 2010) y una tesis de doctorado (Barreto, 2008) que actualmente son de vital importancia para que se pueda mejorar y estandarizar las recomendaciones para los principales cultivos de importancia económica en el país.

### **1.1 Problema**

Las recomendaciones de fertilización química para trigo, soja y maíz que se emplean actualmente en Paraguay, fueron elaboradas en la década del 90, para sistemas de producción que empleaban aradas y rastreadas en la preparación de los suelos; o están basadas en recomendaciones utilizadas en los estados de Paraná, San Pablo, Minas Gerais o Rio Grande del Sur, Brasil y además de la Argentina (Barreto, 2008).

En nuestro país todavía son muy escasas las informaciones referentes a los ajustes necesarios, en cuanto a las recomendaciones de fertilizantes, principalmente para acompañar los últimos avances del sistema productivo, destacando entre ellos la adopción del sistema de siembra directa y el uso de variedades genéticamente modificados que presentan un elevado potencial productivo.

### **1.2 Justificación**

Uno de los principales desafíos de la agricultura moderna es la de proveer a los cultivos los nutrientes en cantidades suficientes y necesarias para que los mismos puedan expresar su máximo potencial productivo, siendo este a más de económicamente viable, también ambientalmente seguro. En este sentido las cantidades de fertilizantes varían de un lugar a otro, dependiendo muchas veces del tipo de suelo, del cultivo y, las condiciones climáticas del lugar, entre otros factores.

Por estas razones, es necesario que las recomendaciones de fertilización se adecuen a las condiciones de clima y suelo del Departamento de Amambay y al sistema de siembra directa empleado actualmente, que ocupa la mayor parte de la superficie de producción agrícola mecanizada en la zona. Para el efecto, se deben

realizar trabajos de calibración de análisis de suelos y generar mayor información sobre dosis adecuadas de fertilizantes químicos, de manera a aumentar la productividad y disminuir costos de producción e impactos ambientales negativos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 General**

Obtener recomendaciones para el uso racional de fertilizantes en los cultivos de la soja, maíz y trigo cultivados en sistema de siembra directa en el Departamento de Amambay

#### **1.3.2 Específicos**

Determinar los niveles críticos para fósforo y potasio en el suelo.

Establecer los niveles de fertilidad para el fósforo y potasio en dos áreas o locales experimentales en el departamento de Amambay.

Crear curvas de respuestas al fósforo y potasio para los cultivos de soja, maíz y trigo en dos áreas representativas de adopción del sistema de siembra directa en el departamento de Amambay.

Determinar las dosis de fertilizantes para la construcción de niveles de fósforo y potasio en el suelo.

## **2 REVISION DE LITERATURA**

### **2.1 Siembra Directa**

El Sistema de Siembra Directa (SSD) se ubica dentro del concepto de la agricultura sostenible, definida como aquella que procura establecer una productividad alta del suelo permanentemente, a manera de conservar o restablecer un medio ecológico equilibrado (Adelgelmy 1985) citado por Miranda (2005).

Según Muzzili (2000) citado por (Anghinoni 2007) para la viabilidad técnica y económica, la siembra directa debe ser visto como un sistema de producción que conlleva un complejo ordenado de prácticas agrícolas interrelacionadas e interdependientes, que incluyen la no remoción del suelo, la rotación de cultivos, el uso de plantas de cobertura para formar y mantener la paja sobre el suelo y, más recientemente la integración de la agricultura con la ganadería.

La ausencia de revolvimiento del suelo y la adición de residuos de los cultivos provocan un flujo continuo de carbono en el suelo, alimentando a los diferentes compartimientos y los procesos de agregación del suelo, originando estructuras más estables. Durante este proceso ocurre un aumento de la actividad biológica, con la manutención de su diversidad, aumentando el tenor de materia orgánica, el reciclaje y almacenamiento de nutrientes, con la manutención del ciclo hidrológico y crecimiento de la capacidad productiva del suelo (Anghinoni, 2007).

Asimismo comenta que, las características del manejo de los suelos en el sistema de siembra directa provocan diferentes alteraciones en el perfil del suelo con relación al cultivo convencional, que influye en la dinámica de acidez y de la disponibilidad de los nutrientes y, por consecuencia, en el manejo de la fertilidad del

suelo, siendo así, ocurre un aumento del tenor y de la calidad de la materia orgánica y de la concentración de los nutrientes a partir de la superficie del suelo.

Según Sá (1999) el comportamiento del fósforo en el sistema de siembra directa difiere, en relación al sistema convencional, en dos puntos básicos: (a) el no revolvimiento del suelo reduce el contacto entre los coloides y el ion fosfato, disminuyendo las reacciones de adsorción, especialmente si la fertilización fue en la línea de la siembra; (b) la mineralización lenta y gradual de los residuos orgánicos proporciona la formación de las formas orgánicas del fósforo menos susceptibles a reacciones de adsorción .

Actualmente, alrededor del 90% de la producción agrícola mecanizada en Paraguay se realiza bajo el sistema de siembra directa (SSD) Este sistema requiere mayor y mejor información para el manejo de la fertilización química, de manera a aumentar la productividad, disminuir costos de producción, y disminuir impactos ambientales negativos. En las dos últimas adopción de SSD, fueron introducidas significativas mudanzas en la producción de granos en el Paraguay, con reflejos en la fertilidad de suelo, destacándose el muestreo del mismo, que pasó a ser realizado en la camada de mayor concentración de nutrientes (0 a 10 cm); y el incremento de la productividad media de los principales cultivos, debido al mejoramiento genético y al uso de prácticas conservacionistas como es el SSD (Derpsch, 2008).

## **2.2 Fertilidad de suelo**

La fertilidad del suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo y que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Sánchez, 2007).

Según Bissani et al. (2008) un suelo fértil es aquel que tiene la capacidad de suplir a las plantas nutrientes esenciales en la cantidades y proporciones adecuadas para su desarrollo, buscando obtener altas productividades. Los conocimientos de la fertilidad del suelo y de las necesidades nutricionales de las plantas posibilitan la identificación y la cuantificación de los nutrientes esenciales, así como la

determinación de las épocas, cantidades y formas más adecuadas para suplementar esos nutrientes para las plantas.

### **2.3 Manejo de la fertilización**

Según Anghinoni y Bayer (2004) citado por Ceretta et al, (2007) el manejo de la fertilización es un conjunto de prácticas u acciones, con la finalidad de disponer eficiente y económicamente la recomendación de fertilizantes a los cultivos. Manejar adecuadamente la fertilización consiste en efectuar un conjunto de decisiones que envuelven las definiciones de las dosis y de las fuentes de nutrientes a ser utilizadas, así como las épocas y formas de aplicación de correctivos y fertilizantes en relación a las condiciones del suelo y del cultivo.

El establecimiento de las prácticas agrícolas adecuadas al manejo correcto de la fertilización, en el sentido de la solución de problemas, no es tarea simple, esto es porque manejar adecuadamente la fertilización implica conocer las plantas y considerarlas como un organismo vivo, siendo necesario conocer la funcionalidad del sistema suelo y relación suelo-planta, así como las técnicas disponibles para el uso eficiente de los fertilizantes (Ceretta et al, 2007).

Los sistemas agrícolas están compuestos de numerosos factores que actúan entre sí, tratando de introducir variabilidad en las condiciones del suelo y la planta, que puedan permitir un aumento de la producción al menor costo, a través de una interpretación adecuada de análisis de suelo, rotación de cultivos con el uso de plantas de cobertura, el control integrado de malezas, plagas y enfermedades, y el manejo eficiente del balance nutricional (Bruulsema, 2009).

En general los fertilizantes son aplicados de manera localizada, como la aplicación en línea de la siembra, o al voleo para los cultivos anuales. El mejor modo de aplicación depende del cultivo que está siendo fertilizada, de las características físicas, químicas y mineralógicas del suelo, del historial de fertilidad del suelo y del fertilizante que está siendo aplicado. Al planear el modo de aplicación también es importante considerar la distribución espacial de las plantas, la densidad y el tipo de sistema radicular, los cuales pueden subsidiar las decisiones. Las condiciones de relieve son igualmente importantes en la tomada de decisión porque, a medida que

aumenta la declividad, mayor es la restricción para la aplicación de fertilizantes al voleo (Ceretta et al, 2007).

De la misma manera alegan que, manejar la fertilización en cuanto a la época de aplicación y proporción de las dosis significa compatibilizar la dinámica de los nutrientes en el suelo con la fisiología de las plantas, considerando de igual forma los aspectos operacionales del cultivo y el comportamiento humano que siempre dificulta la racionalidad plena en las tomas de decisiones. De manera general los nutrientes pocos móviles en el suelo son aplicadas preferencialmente en la siembra y eventualmente en la pre-siembra, en cuanto que aquellos de mayor movilidad son aplicadas racionadamente, es decir una parte en la siembra y el resto en cobertura. Dentro de los nutrientes, el nitrógeno es el principal elemento cuya época de aplicación merece especial atención, por ser, para la mayoría de los cultivos, el nutriente acumulado en mayor cantidad.

Santi (2007) menciona que el uso racional de los fertilizantes aborda varios aspectos que interactúan juntos, destacándose entre ellos la aplicación de la dosis con la fuente correcta, en el momento y en el lugar correcto, relacionado con las condiciones edafoclimáticas u otras prácticas de manejo de suelo o del cultivo, afectando al cultivo inmediato, además con frecuencia la subsiguiente rotación.

Aquino (2009) alega que el mismo se puede lograr o es posible con la optimización del uso de los fertilizantes para las plantas, lo que garantiza la calidad ambiental, donde se busca disponibilizar los nutrientes a las plantas a través de una planificación previa integrada, que se relacione las condiciones económicas y sociales adecuadas para el sistema de producción.

## **2.4 Fertilizantes**

Según la Asociación Nacional para Difusión de Adubos (ANDA, 2000) los fertilizantes son materiales naturales, que contienen nutrientes esenciales para el crecimiento normal y el desenvolvimiento de las plantas.

Alcarde (2007) menciona que los fertilizantes son un producto mineral u orgánico, natural o sintético, proveedor de uno o más nutrientes. La función de los

fertilizantes es la de aportar nutrientes a los suelos para suplir las necesidades de las plantas.

Según la Asociación Nacional para Difusión de Abonos (ANANDA) 2000, los fertilizantes participan de manera significativa en la obtención de la productividad máxima económica de cualquier cultivo. Los fertilizantes ofrecen muchas condiciones de manejo que pueden ser ajustadas a las diferentes situaciones agrícolas y ser más eficientes y de esa manera proporcionar mayor incremento de productividad por unidad de cantidad de fertilizante usada. Para eso es indispensable conocer y aplicar correctamente la tecnología agrícola disponible, relativa a las fertilizaciones.

Tres de los nutrientes tienen que ser aplicados en grandes cantidades: nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes son constituyentes de muchos componentes de las plantas, tales como proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, y son esenciales para procesos tales como transferencias de energía, manutención de la presión interna y acción enzimática (ANANDA, 2000).

#### **2.4.1 Potasio en el suelo y en las plantas**

Según Dechen y Nachtigall (2007) el potasio es uno de los elementos esenciales en la nutrición de la planta, y uno de los tres que se encuentra, en la forma disponible, en pequeños tenores en los suelos tropicales muy intemperizados, limitando el rendimiento de los cultivos. De modo general, las necesidades nutricionales de potasio están relacionadas con cuatro papeles bioquímicos y fisiológicos: activación enzimática, procesos de transporte a través de membranas, neutralización aniónica y potencial osmótico.

Ernani et al (2007) comentan que la deficiencia del potasio normalmente reduce el tamaño de los entrenudos, la dominancia apical y el crecimiento de las plantas, retarda la fructificación y origina frutos de menor tamaño y con menor intensidad del color. Como el nutriente potasio es un elemento móvil en el floema, los síntomas de deficiencia, normalmente caracterizados por clorosis en los bordes de las hojas seguida de necrosis, los cuales surgen inicialmente en las hojas más viejas de las plantas.



El potasio tiene un gran impacto en la productividad y en la calidad de los cultivos, afectando el incremento del peso y la calidad de granos del maíz, contenido de óleo y proteínas en la soja, otro de los efectos atribuidos al potasio se refiere a la resistencia de las plantas, al ataque de enfermedades (Dechen y Nachtigall 2007)

La mayor parte del potasio del suelo (98%) se encuentra en la estructura de los minerales primarios y secundarios (k estructural), y solo una pequeña fracción en las formas más prontamente disponibles para las plantas, sea ligado a las cargas eléctricas negativas o en la solución del suelo. El incremento en la productividad agrícola obtenido con la aplicación de fertilizantes potásicos al suelo varía principalmente con la cantidad de potasio disponible en el suelo, como las especies vegetales, el tenor de agua y el nivel general de la fertilidad del suelo. El tenor de potasio encima del cual no hay un incremento en el rendimiento con la adición de fertilizantes potásicos es definido como el nivel crítico, el cual varía más con el tipo de suelo de que con las especies vegetales (Ernani et al, 2007).

#### **2.4.2 Fósforo en el suelo y en las plantas**

La concentración normal de P en la solución de suelo es casi insignificante (0,03 a 0,3 ppm) de modo que en los suelos pobres debe renovarse miles de veces para cubrir las necesidades de las plantas. La forma de fósforo más importantes en solución son los fosfatos mono y bibásico, que corresponden a las formas asimilables por los cultivos la absorción de fósforo por las plantas está en función en la solución del suelo. Para cada cultivo deberá tomarse como referencia la concentración y velocidad de reposición optimas para cubrir las necesidades en los periodos críticos (Domínguez, 1989).

Según Bissani et al (2008) el contenido de fósforo en las plantas es siempre menor que el de N y de K en general es semejante a los de S, Mg y Ca, por lo que puede ser un factor muy limitante en el rendimiento de los cultivos, en suelos ácidos. Esto se debe al hecho de que, a pesar de que los suelos contienen grandes cantidades de P total, su disponibilidad para las plantas es muy pequeña debido a la tendencia del P en formar compuestos de muy baja disponibilidad en el suelo.

Del mismo modo continúan diciendo que la cantidad total del P en los suelos es bastante variable, dependiendo principalmente del tenor en el material de origen del suelo y de la edad o estadio de desenvolvimiento del mismo. La disponibilidad del fósforo del suelo para las plantas depende de los factores que el movimiento del P de la solución del suelo hasta la superficie de las raíces, de la capacidad del suelo de mantener P en la solución y de otros factores limitantes al crecimiento de la planta.

Según POTAFOS (1996) el P es un componente vital en el proceso de conservación de la energía solar en alimentos, fibra y aceite por las plantas. El P desempeña una función clave en la fotosíntesis en el metabolismo de azúcares, en el almacenamiento y transferencia de energía, en la división celular, en el alargamiento de las células y en la transferencia de las informaciones genéticas. El fósforo promueve la formación y el desenvolvimiento de las raíces, el crecimiento de las plantas, acelera la cobertura del suelo para la protección contra la erosión, afecta la calidad de las frutas, de los vegetales y de los granos y es de vital importancia para la formación de semillas.

Dechen y Nachtigall (2007) alegan que el fósforo promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces, mejora la calidad de los frutos, hortalizas y granos, siendo vital para la formación de semillas, así también está envuelto en la transferencia de características hereditarias. Como el fósforo se mueve rápidamente de los tejidos más viejos para los más jóvenes, la deficiencia aparece primero en las partes bajas de las plantas, es decir, las hojas viejas. A medida que las plantas se vuelven más viejas, la mayor parte del fósforo se mueve para las semillas o para los frutos.

Según Chaves y Oba (2004) el fósforo es uno de los macro nutrientes primarios necesarios para las plantas, es un elemento muy mal distribuido y poco abundante en la costra terrestre 0,12%. La ausencia de fósforo en la nutrición vegetal limita el crecimiento y reproducción de la planta, los vegetales absorben fósforo de manera continuada, desde la germinación hasta la fructificación. Asimismo comentan que el fósforo fue el primer elemento en ser adicionado por la fertilización artificial. Los países desenvueltos, usualmente, fertilizan los suelos con cantidades superiores a

las necesidades asimilables por los cultivos y, con esto, los se están tornando progresivamente más pobres en fósforo.

Fatecha (1999) menciona que en suelos con alta capacidad de fijación se debe aplicar el fertilizante fosfatado en forma localizada, colocándolo en el fondo del surco y cubriéndolo posteriormente con el suelo, tratando de evitar el contacto directo del fertilizante con la semilla. La aplicación localizada permite una menor superficie de contacto entre el granulo fertilizante y el suelo, disminuyendo consecuentemente la fijación del P. la aplicación al voleo se recomienda realizar cuando el suelo posee bajo poder de fijación, es decir bajo contenido de arcilla, ausencia en óxidos hidratados de Fe, Al y pH de 6 a 7.

Granada (2010) aplicando superfosfato triple como fuente de fósforo, en la localidad de Campo 9 Departamento de Caaguazú, Paraguay encontró que en sistemas de producción de trigo/soja y trigo/maíz, la aplicación de 50 kg/ha de  $P_2O_5$  antes del cultivo de trigo, mantiene la concentración de P en el suelo (fertilización de reposición). La aplicación de más de 200 kg/ha de  $P_2O_5$  al suelo tiene un efecto residual, quedando parte del fertilizante disponible para cultivos subsiguientes (dosis de creación de nivel de fertilidad).

## **2.5 Calibración de análisis de suelo**

Un aspecto fundamental para la correcta interpretación de un análisis de suelo es que la metodología empleada en el análisis haya sido previamente evaluada y calibrada. Las mejores y más apropiadas calibraciones se obtienen a partir de ensayos a campo, sobre diversidad de suelos, en diversos cultivos, en los cuales importantes respuestas en rendimiento han sido observadas en condiciones normales o buenas para el crecimiento de los cultivos (Bernier, 2000). Datos de cultivos de bajos rendimientos no deberían de tenerse en cuenta para calibrar un análisis de suelo para un nutriente determinado, se deben graficar los valores de análisis en función del rendimiento expresado como porcentaje del máximo obtenido en los ensayos a campo.

En el proceso de calibración, se establece la relación entre el resultado analítico y el porcentaje del rendimiento máximo que es posible alcanzar con ese

nivel de disponibilidad, y la respuesta que se puede esperar al aplicar un fertilizante potásico. Durante el proceso de calibración se correlacionan los resultados de los análisis con la producción de un cultivo, es decir, se relaciona matemáticamente la concentración de potasio extraído y la respuesta de la planta a la adición de potasio (Ferreira Novais et al. 2007). Con ello, se puede clasificar el nivel de potasio en el suelo como bajo, medio o alto, y calcular la dosis de fertilizante a ser aplicado.

Para una buena calibración es necesario que los experimentos de campo integren los factores que influyen en la fertilidad del suelo y la nutrición de plantas. Con estos experimentos se define la respuesta del cultivo a las dosis de nutrientes o más concretamente la respuesta al aumento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Ferreira Novais et al. 2007). Uno de los propósitos de la calibración es facilitar la interpretación de resultados de análisis de suelo de manera simple. Antes de la calibración, un análisis químico de suelo no puede diferenciar la proporción del potasio total que se encontrará disponible para la planta durante el ciclo del cultivo; por ello, es necesario correlacionar el potasio extraído en el análisis químico con el rendimiento del cultivo en el campo (Vitti, 1994).

Según Raij (1991), la definición del punto crítico es práctico, simple y útil, pero se necesita más distinción para evaluar la fertilidad de suelo con el pasar del tiempo. El mismo autor sugiere establecer fajas de fertilidad a partir del rendimiento relativo de la siguiente forma: la clase “muy bajo” corresponde a la faja de 0-70% de rendimiento relativo, la clase “bajo” corresponde a la faja de 70-90%, y la clase “medio” corresponde a la faja de 90-100%. En la clase “alto” se espera que la cantidad de nutrientes sea suficiente para alcanzar rendimientos máximos.

## **2.6 Antecedentes de los trabajos de calibración realizados en el Paraguay**

En el Paraguay, los trabajos sobre calibración de análisis de suelo y formulación de recomendaciones de fertilización a partir de los mismos, son escasos y relativamente recientes. Las principales investigaciones en casa de vegetación y a campo, fueron conducidas en la década de 1990, para cultivos de renta en sistemas

productivos que utilizaban aradas y rastreadas para la preparación de suelos (Fatecha 1999).

En los últimos años se han ido realizando trabajos sobre calibración de análisis de suelo, principalmente de dos nutrientes, que son en este caso el P y el K. en ese sentido, se realizaron calibraciones de análisis de suelo para el fósforo para los cultivos de trigo, maíz y soja en sistema de siembra directa, siendo estos experimentos realizados en los Departamentos de Misiones, Alto Paraná, Itapúa y Amambay de la región Oriental del Paraguay (Cubilla, 2005; Barreto, 2008). Con apoyo en estos experimentos, el nivel crítico de fósforo en el suelo fue establecido en  $12 \text{ mg.dm}^{-3}$ . De igual manera, en trabajos realizados considerando al potasio en este caso, el nivel crítico encontrado para el potasio fue de  $75 \text{ mg.dm}^{-3}$  (Barreto, 2008).

En un trabajo reciente, Cubilla et al (2012) publicaron un libro conteniendo recomendaciones para la fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio, para soja, trigo, maíz y girasol cultivados en siembra directa en la Región Oriental de Paraguay. Esta publicación tuvo como base los datos generados por los trabajos de tesis de maestría y doctorado (Cubilla, 2005; Wendling, 2005; Hann, 2008; Barreto, 2008; Fatecha, 2010) y el apoyo de profesores del Departamento de Suelos de la Universidad Federal de Santa María (UFSM). La investigación a campo se desarrolló en siete localidades distribuidas en los Departamentos de Alto Paraná, Itapúa, Amambay y Misiones.

### **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Localización de la investigación**

El trabajo de investigación fue llevado a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias filial Pedro Juan Caballero, destacando que, los datos que fueron utilizados para el mismo corresponden a los obtenidos de un conjunto de experimentos ejecutados en dos áreas experimentales, ambos ubicados en el Departamento de Amambay ubicado en el nordeste de la región oriental con  $22^{\circ}5'$  y  $23^{\circ}5'$  de latitud sur,  $55^{\circ}00'28''$  y  $57^{\circ}00'00''$  de longitud nordeste del territorio paraguayo. Las dos parcelas experimentales en estudio fueron instaladas en el Distrito de Pedro Juan Caballero, siendo ambas ubicadas en las colonias, Vicepresidente Sánchez (Granja Gredos) y Raúl Ocampos Rojas (Granja Weaver).

##### **3.1.1 Descripción del área experimental**

La región en donde fueron implantados las dos áreas experimentales corresponden al tipo aw (Tropical, con invierno seco) de Koeppen (1936) con temperatura media anual de  $22^{\circ}\text{C}$  y con una precipitación media anual entre 1.000 a 1.200 mm anuales, siendo los meses más lluviosos, diciembre y enero, los meses menos lluviosos junio, julio y agosto.

El tipo de suelo en ambas parcelas experimentales corresponden a un Alfisol clasificación Americana (López et. al. 1995) o Latossolo clasificación Brasileira (EMBRAPA 1999), de textura franco arcillosa, cuyas características físico-químicas se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resultado del análisis físico-químico del área antes de la instalación del experimento en ambas parcelas. (Rodríguez 2009; Barreto 2009).

Local	pH agua	P	K	Text.Tacto
		mg.kg <sup>-1</sup>	cmol.	
Granja Weaver	5,30	7,50	0,42	F. a.
Granja Gredos	5.30	22.49	0.21	F. a.

### 3.2 Población de unidades y variables de medición

Los datos que fueron utilizados para el estudio corresponden a los resultados de un conjunto de experimentos llevados a cabo en dos localidades del Distrito de Pedro Juan Caballero que son consideradas las áreas más representativas del sector productivo en lo que respecta a la producción de granos de la región, además de un historial considerable en la adopción del sistema de siembra directa en el Departamento, en donde, el área total de las dos parcelas experimentales fue de 5400 m<sup>2</sup>, siendo utilizadas en las mismas 180 unidades experimentales para cada una, destinándose para cada parcela un área de 30 m<sup>2</sup>. Cabe mencionar que, en esta investigación fueron evaluados los rendimientos obtenidos en cada una de las zafras de los cultivos de soja, maíz y trigo en los diferentes tratamientos o dosis de fósforo y potasio de las dos áreas instaladas, así como los resultados de análisis de suelos obtenidos de cada una de ellas.

Las variables evaluadas en esta investigación fueron: el rendimiento, la dosis de P y K, el rendimiento relativo, los niveles de fertilidad, el nivel crítico de P y K y las curvas de respuestas.

### 3.3 Descripción del experimento (delineamientos, unidades experimentales y tratamientos)

El delineamiento experimental utilizado en las dos áreas experimentales fue el de bloques completos al azar, donde en la primera etapa se tuvo 15 tratamientos y

tres repeticiones considerando los tres nutrientes evaluados es decir, el N, P y K, ese esquema fue utilizado para el cultivo de trigo en la primera etapa, mientras que en los siguientes zafra, se utilizaron catorce tratamientos y tres repeticiones, recalando que en esta investigación solo fueron estudiados dos de ellas, es decir, el P y el K. En este sentido, cada parcela tuvo un área de 30 m<sup>2</sup> con 180 unidades experimentales cada una, abarcando un área total de 5400 m<sup>2</sup> en cada una de las parcelas instaladas.

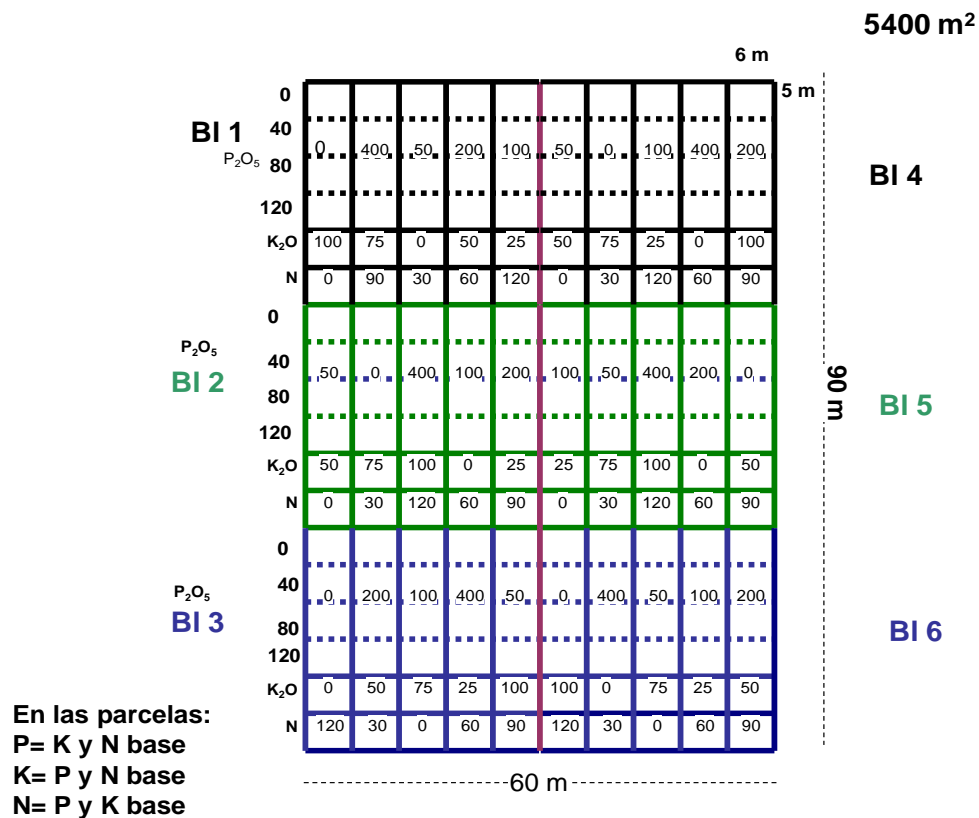
Cabe destacar en este punto, que en cada bloque de 30 parcelas, 20 parcelas fueron destinadas para el nutriente fósforo, mientras que 5 parcelas correspondían para el potasio y el 5 restante para el nitrógeno conforme al croquis experimental (Figura 2), donde las dosis utilizadas fueron de 0, 25, 50, 75 y 100/ha respectivamente para el potasio, mientras que, para el fósforo fueron utilizadas dosis diferenciadas en las dos etapas, es decir, en la primera zafra con el cultivo de trigo fueron creados los niveles de fertilidad para el citado nutriente con dosis de 0, 50, 100, 200 y 400 kg/ha de P, siendo que con la zafra siguiente de soja y maíz las dosis correspondieron a 0, 40, 80 y 120 kg/ha de P, destacando que para ambos nutrientes se aplicaron bases, de modo a aislar el nutriente en estudio. La parcela útil fue calculada considerando cada una de las zafra de los diferentes cultivos, variando en cada una de ellas, donde para el cultivo del trigo se tuvo en cuenta 6 hileras centrales por 3 metros de longitud, mientras que para los cultivos de soja y maíz se considero las tres hileras centrales de cada unidad experimental, con áreas de 2,7 y 5,4 m<sup>2</sup>, siendo la misma considerada, para que en los resultados no influya el efecto de borde.

En este sentido fueron usados los datos de los resultados obtenidos en las diferentes etapas o zafra de las investigaciones realizadas en ambas parcelas, considerando el rendimiento de cada cultivo y el resultado de los análisis de suelo generados en cada etapa, donde, para el área situada en la colonia Raúl Ocampos Rojas, Chiriguelo (Granja Weaver), fueron consideradas dos etapas de las investigaciones, es decir, lo realizado por Rodríguez con la zafra de trigo 2009 y González con la zafra de soja y maíz 2009/2010, siendo similar en la Granja Gredos (Yvype), evaluándose en este caso, los realizados por Barreto con el cultivo de trigo zafra 2009 y Ayala con la zafra 2009/2010 de los cultivos de soja y maíz. Estos



experimentos fueron realizados en suelos con diferentes texturas y niveles iniciales de fertilidad (Tabla 1), en zonas consideradas, las más representativas de producción de granos, en localidades con un histórico en la adopción de sistema de siembra de directa en el Departamento, siendo ambos experimentos llevados a cabo en simultáneo en distintas regiones del departamento de Amambay.

Cabe destacar que, con el objetivo de ampliar el banco de datos generados en las investigaciones mencionadas y por ende realizar una mejor calibración, serán utilizados en este estudio, los datos registrados por Barreto 2008, en una investigación similar llevado a cabo en el Campo Experimental de la FCA-PJC.



**Figura 1.** Diseño del experimento en bloques completamente al azar al inicio de la investigación.

Cultivo de soja						Cultivo de maíz					
BLO 1	0	120	120	40	80	40	80	40	120	0	BLO 4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	80	40	40	0	0	0	120	0	40	80	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	40	0	80	80	120	120	0	80	0	40	
	120	80	0	120	40	80	40	120	80	120	
K <sub>2</sub> O	100	75	0	50	25	50	75	25	0	100	K <sub>2</sub> O
N	0	90	30	60	120	0	30	120	60	90	N
BLO 2	120	0	80	40	0	40	80	40	120	0	BLO 5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40	40	0	80	80	0	120	80	80	80	
	0	120	120	0	120	80	0	0	40	40	
	80	80	40	120	40	120	40	120	0	120	
K <sub>2</sub> O	50	75	100	0	25	25	75	100	0	50	K <sub>2</sub> O
N	0	30	120	60	90	0	30	120	60	90	N
BLO 3	80	0	0	80	120	120	80	0	80	120	BLO 6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40	80	40	0	0	0	40	120	0	0	
	120	40	120	40	80	40	120	80	40	80	
	0	120	80	120	40	80	0	40	120	40	
K <sub>2</sub> O	0	50	75	25	100	100	0	75	25	50	K <sub>2</sub> O
N	120	30	0	60	90	120	30	0	60	90	N

**Figura 2.** Esquema de distribución de los tratamientos en la parcela experimental del segundo periodo (Granja Weaver).

### **3.4 Descripción del proceso de recolección de datos**

#### **3.4.1 Etapas de la Calibración**

##### **3.4.1.1 Muestreo de suelo**

Antes de instalarse las dos áreas experimentales, de las mismas fueron extraídas las muestras de suelos correspondientes, los cuales se realizaron con el propósito de detectar los niveles de nutrientes en el suelo.

De la misma forma se realizaron colectas de suelo después de cada zafra, es decir, después de la cosecha de los cultivos de trigo zafra 2009, así como de la soja y maíz 2009/2010. La metodología del muestreo utilizado en el proceso fue similar en ambas áreas, y las mismas se detallan a continuación; se sacaron muestras de cada unidad experimental es decir de las 180 parcelas, de las cuales fueron extraídos 10 submuestras totalizando con ella 1800 submuestras en cada etapa, los cuales una vez mezclados fueron etiquetados y codificados obteniéndose de esa forma 180 muestras compuestas de cada una de las áreas en estudio, es decir, tanto en la Granja Agrícola Gredos como en la Granja Weaver.

Para tal efecto fue utilizado un instrumento llamado trado (barrena) calador a una profundidad de 0 a 10 cm.

##### **3.4.1.2 Análisis de suelo**

Una vez obtenidos las muestras de suelos, las mismas fueron conducidas al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Asunción para su posterior análisis. En el laboratorio, las muestras se secaron al aire y fueron pasadas a través de un tamiz de 2 mm, para obtener lo que se conoce como tierra fina secada al aire y luego almacenados en frascos de plásticos de 200 ml con su identificación correspondiente. Los contenidos de fosforó y potasio fueron extraídos por el método Mehlich<sup>1</sup>(solución que contiene ácido sulfúrico y ácido clorhídrico), (Tedesco 1995). La concentración de fosforo fue determinada por colorimetría sobre el complejo azul producido por la reducción del ácido ascórbico del fosfomolibdato,

utilizando un espectrofotómetro colorímetro con longitud de onda de 740nm y con una transmitancia del 100%.

Asimismo, es importante destacar que, además de los datos obtenidos en estas etapas de investigaciones, también serán considerados los datos registrados por Barreto 2008, el cual va a ser integrado con los actuales de manera a aumentar la base de datos y contribuir para una mejor calibración.

### 3.4.1.3 Interpretación

En la etapa de interpretación fueron definidos, los rendimientos relativos para cada nutriente, donde para el efecto, fue utilizado la siguiente ecuación:

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimiento de la parcela testigo}}{\text{Rendimiento máximo o Máxima Eficiencia Técnica}} \times 100 \quad (1)$$

En la Ecuación 1, el rendimiento de la parcela testigo corresponde al intercepto en la ecuación de regresión entre las dosis de fósforo y el rendimiento del cultivo. El valor de rendimiento máximo se calculó de diferentes maneras según fue la respuesta del cultivo a la aplicación del fertilizante. En el caso de respuesta lineal positiva, el rendimiento máximo correspondió al valor estimado por la ecuación de regresión en el máximo de la dosis de fósforo aplicado; en caso de respuesta negativa, el rendimiento máximo correspondió al intercepto en la ecuación de regresión. En el caso de respuesta polinomial de segundo grado, se utilizó la técnica de la derivación para determinar el valor de X para que la función alcance el punto máximo, luego se reemplazó el valor de X en la función polinomial para determinar el rendimiento máximo (Raij, 1991; Cubilla, 2005; Barreto 2008).

La función utilizada para el ajuste de los datos de calibración fue el de Mitscherlich modificada, utilizando el programa “Sigma Plot v12.1”, que clasifica los datos por el valor de  $R^2$ . La ecuación de forma exponencial se expresa de la siguiente forma:

$$y = A (1 - 10^{-bx})$$

Donde;  $y$ ; representa el rendimiento relativo (RR),  $A$ ; representa la productividad máxima,  $b$ ; coeficiente de eficiencia,  $x$ ; es la cantidad de (fosforo, potasio) en kg. ha.<sup>-1</sup>

Las cantidades de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O necesarias para elevar o reducir 1 ppm el contenido de P y K en el suelo fueron establecidas por la capacidad tampón aparente, determinada según la ecuación siguiente (Santi 2007):

$$CTA \text{ (kg/ha)} = \frac{Kg/ha \quad NA - Kg/ha \quad NE}{TFN - TIN}$$

Donde; CTA; representa la capacidad tampón aparente, NA; nutriente adicionado, NE; nutriente exportado, TFN; tenor final del nutriente, TIN; tenor inicial del nutriente.

Los datos a ser utilizados para determinar el balance de nutrientes, evolución temporal y la capacidad tampón del suelo fueron tabulados, ordenados por periodo y tratamiento para luego procesarlos en una planilla electrónica Excel. Los resultados de balance de nutrientes y tenores finales de fosforo y potasio en el suelo fueron comparados con los rendimientos de los cultivos y ajustados mediante ecuaciones de regresión.

A partir del cálculo de los rendimientos relativos fueron definidas los niveles de fertilidad en el suelo, los cuales pueden subdividirse a partir del rendimiento relativo en la clase “muy bajo” correspondiente a la faja de 0 a 70% de RR, y los tenores de P para esta faja se encuentran entre 0 y 15 mg.dm<sup>-3</sup>, la clase “bajo” que corresponde a la faja de 70 a 90% del RR y los tenores P en el suelo para esta faja se encuentran entre 15 y 29 mg.dm<sup>-3</sup>, la clase medio corresponde a la faja de 90 a 100% de RR, y los tenores de P en el suelo para esta faja van desde 29 a 62 mg.dm<sup>-3</sup>, metodología adaptada de (Raij et al, 1997). En la clase alto se espera que la cantidad de nutrientes en el suelo sea suficiente para alcanzar rendimientos máximos y para establecer el rango de RR, se utiliza el límite inferior de tenores altos multiplicado por 2 (dos).

#### **3.5.1.4 Recomendación**

Los sistemas de recomendaciones de fertilizantes tienen como principal propósito elevar los tenores de nutrientes en el suelo a niveles adecuados para los cultivos de manera a que los mismos puedan expresar su máximo potencial de rendimiento, siempre que los demás factores no sean limitantes. En este sentido en esta investigación se optó por realizar las recomendaciones en base a la cantidad de los nutrientes en el suelo, donde según la cantidad de P y K en el suelo es decir, según los niveles ya preestablecidos, siendo así se puede optar por una recomendación de fertilización correctiva cuando los niveles estén en muy bajo, bajo y medio, fertilización de mantenimiento cuando el nivel este en el nivel alto y de reposición en el caso de muy alto, siendo las mismas definidas teniendo en cuenta la relación del nivel de nutriente en el suelo y el rendimiento relativo de los cultivos.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En este punto son presentados los resultados obtenidos en las diferentes zafras de los cultivos de trigo, soja y maíz implantados durante el proceso de la investigación, en este caso, evaluando el rendimiento de los mismos con la aplicación de fertilizantes fosfatados y potásicos en las dos áreas experimentales instaladas. Asimismo serán presentados los niveles críticos calculados para cada nutriente, así como las fajas de fertilidad establecidas para cada una de ellas.

Con el objetivo de aumentar los bancos de datos de esta tesis, serán integradas al mismo los datos de Barreto 2008, realizándose este con el principal propósito de dar mayor confiabilidad al trabajo de calibración.

### **4.1 Respuestas de los cultivos de trigo, soja y maíz, con la influencia de la fertilización fosfatada**

Considerando el rendimiento de los cultivos en cada una de las zafras, se puede apreciar que las mismas presentaron respuestas diferenciadas a la aplicación del fertilizante fosfatado. En la primera etapa de la investigación con la zafra 2009 del cultivo de trigo fueron aplicados cinco dosis de fósforo con 0, 50, 100, 200 y 400 kg/ha, los cuales se aplicaron con un propósito doble, es decir, en primer lugar evaluar el rendimiento del trigo a las dosis de P aplicados y, en segundo crear los niveles de fertilidad de suelo para el citado nutriente, en donde, en las zafras siguientes se aplicaron sobre esos niveles creados cuatro dosis crecientes de P (0, 40, 80, 120 kg/ha respectivamente) de manera a crear las curvas de respuestas para el mismo.

En este sentido, a continuación se presentan los resultados de análisis de regresión para los cultivos de trigo, soja y maíz, en los que, en algunos de

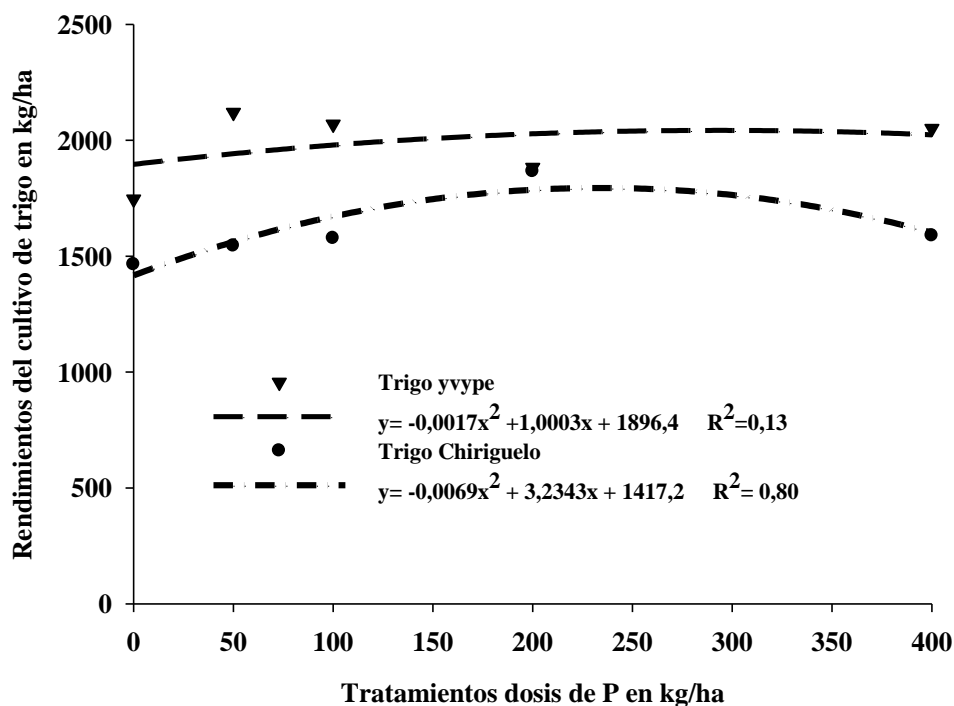
los casos, la función con mejor ajuste fue la lineal, y en otros la polinomial de segundo grado, destacando que sobre esta base fueron calculados los rendimientos relativos de los cultivos, para luego ser utilizados en la calibración de fósforo extractable con la solución Mehlich<sup>-1</sup>.

#### **4.1.1 Respuestas del cultivo de trigo**

En la figura 4, se observa la respuesta del cultivo de trigo a la aplicación de dosis crecientes de P en las dos áreas instaladas, donde en la misma, se puede apreciar que, tanto en la Granja Weaver (Chiriguelo), como en la Granja Gredos (Yvype) la tendencia con mejor ajuste para la ecuación correspondió a una cuadrática, comportamiento que se adecua a la ley de los rendimientos decrecientes, el cual nos dice que, que los cultivos solo responden hasta cierto punto a la aplicación de mas dosis de fertilizantes, luego la misma tiende a decaer. Asimismo se puede apreciar las respuestas que presentaron los cultivos a la aplicación de dosis crecientes de P, donde, al comparar los rendimientos obtenidos en las dos áreas, se puede constatar que, en la Granja Gredos (Yvype) se obtuvieron los mejores rendimientos, el cual puede ser atribuido a la cantidad inicial de fósforo en el suelo, siendo ampliamente mayor en la Granja Gredos (Yvype).

De igual modo, fueron determinados la dosis de máxima eficiencia económica y la máxima eficiencia económica con valores de 232 y 1.840 kg/ha para la Granja Gredos (Yvype) 165 e 1.616 kg/ha en la Granja Weaver (Chiriguelo), valores con los que se asumen se obtendría el mayor retorno económico para el productor.





**Figura 3.** Producción de granos de trigo, en función a las dosis de P aplicados en el suelo, en las dos parcelas experimentales.

#### 4.1.2 Respuestas del maíz

En la tabla 2, se aprecia la concentración de P en cada una de los niveles de fertilidad creada en la primera zafra con el cultivo de trigo en las dos áreas experimentales instaladas, Chiriguelo e Yvype (Granja Weaver y Granja Gredos) antes de la siembra del cultivo de maíz. Asimismo se observa las ecuaciones que describen las funciones de producción, el rendimiento relativo, los coeficientes de determinación, las dosis de máxima eficiencia técnica y económica y los rendimientos de máxima eficiencia técnica y económica del cultivo de maíz en las dos colonias. Las figuras que representan la relación entre la cantidad de P aplicado sobre los niveles citados y el rendimiento de los cultivos en cada uno de ellos están expuestos en el anexo.

En este sentido al considerar el nivel 0 en las dos áreas experimentales, se tiene que, en ambas se registraron diferencias en cuanto a las respuestas del cultivo a la fertilización de dosis crecientes de P, donde los mejores rendimientos se presentaron en la Granja Weaver (Chiriguelo), presentando una respuesta favorable a

las dosis aplicadas y con una tendencia de seguir respondiendo a la aplicación de mas dosis, ya que, el rendimiento relativo del mismo fue de solo de 52%, mientras que, en la Granja Gredos (Yvype) el rendimiento relativo fue 81%, lo cual nos indica una menor respuesta. Cabe mencionar que la tendencia de la ecuación en la Granja Weaver (Chiriguelo) correspondió a la lineal positiva, el cual nos indica que, a medida que aumentemos las dosis de los fertilizantes el rendimiento tendrá un crecimiento proporcional ascendente al mismo, recordando que tal afirmación no se adecua a la ley de los rendimientos decrecientes, ley este que nos dice, que un determinado cultivo solo responden hasta un cierto punto a la aplicación de dosis crecientes, luego la misma tiende a decaer, es decir, la aplicación de mas dosis en vez de generar una respuesta positiva en el cultivo, generaría ya una negativa volviéndose toxico para el mismo, no obstante en la Granja Gredos se ajusto una ecuación cuadrática. La baja respuesta a la fertilización fosfatada en la Granja Gredos (Yvype) se le es atribuible a la alta cantidad de P encontrado en el área experimental, siendo la misma detallada en la Tabla 1.

Considerando los demás niveles de fertilidad se puede constatar que en la Granja Weaver (Chiriguelo), al igual que en el nivel cero, también se ajustaron una ecuación lineal positiva a los demás niveles, en este caso a los niveles de 100 y 200, observándose igual comportamiento en los niveles de 50 y 400 en la Granja Gredos (Yvype). Dicha tendencia nos indica, que a mayor dosis aplicado mayor será la respuesta por parte de los cultivos, en estos casos, la dosis de máxima eficiencia técnica correspondió a la aplicación de la dosis mayor utilizado en esta investigación, en este punto correspondiente a la aplicación de 120 kg/ha de P, en la Granja Weaver (Chiriguelo) no se presentaron respuestas negativas a la fertilización fosfatada, no obstante, en la Granja Gredos (Yvype) si se registraron en uno de los niveles (Nivel 100), comportamiento tal, que se puede atribuir a la alta concentración de P encontrado en el citado nivel, siendo la misma apreciable en la Tabla 2.

Teniendo en cuenta los cálculos de la máxima eficiencia económica en la dos áreas, en este caso, enfatizando a la tendencia polinomial o cuadrática presentado por las ecuaciones, se tiene que, el mayor rendimiento se registro en la Granja Weaver (Chiriguelo) con rendimientos de hasta 9.378 kg/ha de maíz, para lo cual se

tuvo que aplicar una dosis de máxima eficiencia económica de 67 kg/ha, registrándose la misma en el nivel de fertilidad 50. Comparando el rendimiento de las dos áreas se aprecia mayor respuesta en la Granja Weaver (Chirigüelo) con tendencias de mejores rendimientos, lo que podría deberse a la concentración inicial del P en el suelo de dicha localidad, tal como se puede apreciar en la Tabla 1 de las características físico-químicas encontradas antes de la instalación del experimento.

**Tabla 2.** Concentración de fósforo en el suelo, ecuación según función de producción, Coeficiente de Determinación, Rendimiento Relativo, Dosis de Máxima eficiencia técnica y económica, Rendimientos de Máxima Eficiencia Técnica y Económica del maíz en las dos áreas.

Experimento	Dosis de creación	Fósforo en el	Ecuación	R <sup>2</sup>	RR*	Dosis	Rend.	Dosis	Rend.
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	suelo				MET**	MET**	MEE***	MEE***
	-----Kg/ha-----	----mg.dm <sup>-3</sup> ---			%	-----	-----	Kg/ha	-----
Chiriguelo	0	6,26	$y = 45,73x + 6051$	0,895	52	120	11538	108	10384
	50	9,10	$y = -0,135x^2 + 22,79x + 8457$	0,819	90	84	9419	67	9378
	100	8,82	$y = 16,22x + 5948$	0,915	75	120	7894	108	7105
	200	7,85	$y = 15,70x + 4957$	0,853	72	120	6841	108	6157
	400	17,71	$y = -0,612x^2 + 83,50x + 3969$	0,984	77	85	5272	64	5196
Yvype	0	17,92	$y = -0,167x^2 + 29,16x + 5719$	0,935	81	87	7088	74	6960
	50	15,36	$y = 9,941x + 6029$	0,06	83	120	7222	108	6500
	100	18,21	$y = -5,097x + 6864$	0,66	100	0	6864	0	6864
	200	16,21	$y = -0,380x^2 + 36,61x + 6677$	0,587	88	48	7559	40	7536
	400	32,71	$y = 6,361x + 6067$	0,368	64	120	6067	108	5460

\*Rendimiento Relativo \*\*Máxima eficiencia técnica \*\*\* Máxima eficiencia económica

### 4.1.3 Respuestas del cultivo de la soja

En la Tabla 3, son observadas las concentraciones de P en cada uno de los niveles antes de la implementación del cultivo de maíz y la aplicación de dosis crecientes de P sobre esos niveles creados. Asimismo son presentadas la ecuación que describe la función de producción, el coeficiente de determinación, la respuesta de la soja expresada en porcentaje de la producción máxima (rendimiento relativo), la dosis de máxima eficiencia técnica y económica y el rendimiento de máxima eficiencia técnica y económica de la soja en las dos colonias en donde fueron instalados las áreas experimentales. Las figuras que describen la relación existente entre las dosis de P aplicados y el rendimiento obtenido con ellas son incluidas en el anexo.

Considerando la productividad de la soja influenciados por las dosis crecientes de P, se puede apreciar que, en las dos áreas las respuestas no fueron muy buenas con rendimientos relativos promedios de 94% en la Granja Gredos (Yvype) y 91% en Weaver (Chiriguelo), lo que nos indica el bajo grado de respuesta a la fertilización, esta situación puede ser atribuida a varios factores entre ellos a la concentración inicial del P en la parcela experimental específicamente en la colonia Yvype (Granja Gredos), cuyos niveles o fajas de fertilidad estaba entre medio y alto, asimismo puede deberse a la fijación de P, a la cantidad de P disponible y a la heterogeneidad de cada unidad experimental. Sin embargo haciendo comparaciones en cuanto a los rendimientos obtenidos en cada uno de los niveles y comparando en este punto la productividad en las dos áreas, se puede constatar que los mejores rendimientos fueron obtenidos en la Granja Gredos con rendimientos de hasta 4.597 kg/ha de soja.

De forma general fue muy poco la diferencia registrada entre los rendimientos obtenidos en las dosis testigo y las dosis de mayor rendimiento, principalmente en la Granja Gredos, tal hecho es atribuible en mayor proporción a la cantidad inicial de P en el área, tal como ya fue especificado con anterioridad, en este sentido optar por aplicar esas dosis no sería económica ni técnicamente recomendable para un productor.

**Tabla 3.** Concentración de fósforo en el suelo, fajas de fertilidad, ecuación de la función de producción, coeficiente de determinación, rendimiento relativo, dosis de máxima eficiencia técnica y económica y rendimiento de máxima eficiencia técnica y económica de soja en las dos áreas.

Experimento	Dosis de creación	Fósforo en el	Ecuación	R <sup>2</sup>	RR*	Dosis	Rend.	Dosis	Rend.
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	suelo				MET**	MET**	MEE***	MEE***
	---Kg/ha---	---mg dm <sup>-3</sup> ---			-%-	-----	Kg/ha	-----	-----
Chiriguelo	0	3,41	$y = 0,122x^2 + 14,98x + 3586$	0,575	89	61	4046	52	4036
	50	5,97	$y = -5,242x + 3718$	0,54	100	0	3718	0	3718
	100	7,68	$y = -0,051x^2 + 4,871x + 3390$	0,374	97	48	3506	25	3480
	200	8,25	$y = -0,187x^2 + 21,13x + 29,69$	0,951	83	56	3566	51	3559
	400	23,04	$y = -0,102x^2 + 1,949x + 2977$	0,569	84	74	3537	63	3525
Yvype	0	27,31	$y = -0,089x^2 + 8,040x + 4159$	0,995	96	45	4341	33	4327
	50	8,96	$y = -0,042x^2 + 5,582x + 3830$	0,363	97	42	4053	40	4052
	100	10,24	$y = -0,065x^2 + 9,324x + 4175$	0,565	93	72	4509	55	4491
	200	11,95	$y = 5,607x + 3705$	0,856	85	120	4378	108	3940
	400	29,02	$y = -0,052x^2 + 1,949x + 4579$	0,991	99	19	4597	0	4579

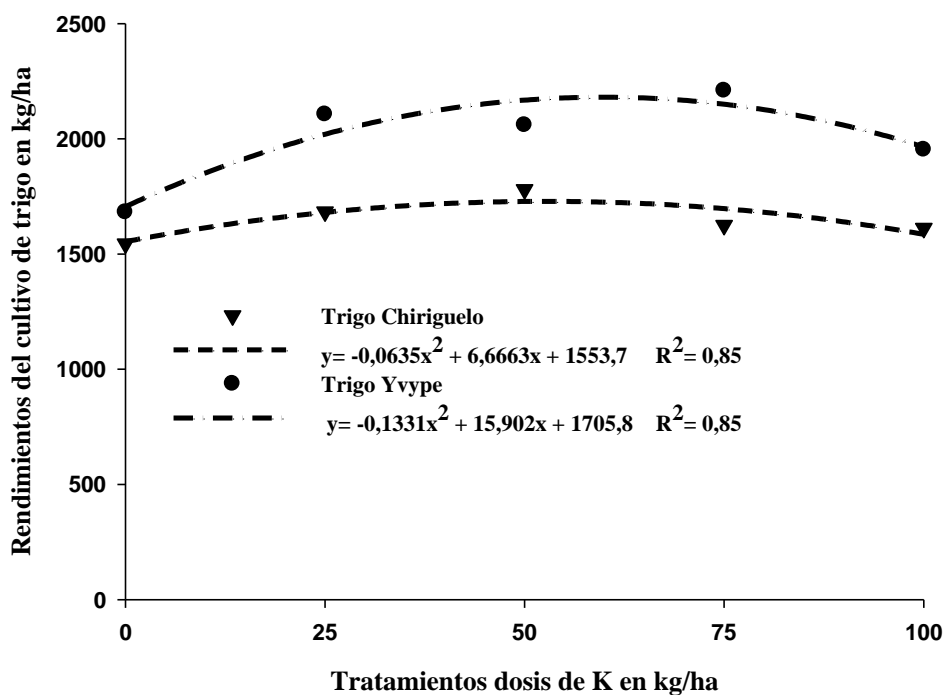
\*Rendimiento Relativo \*\*Máxima eficiencia técnica \*\*\* Máxima eficiencia económica

## **4.2 Respuestas de los cultivos de trigo, soja y maíz, con la influencia de la fertilización potásica.**

En este punto se presentan los resultados de análisis de regresión, donde se aprecia las respuestas presentados por los cultivos a la fertilización potásica, en las que, para el efecto fueron utilizados cinco dosis correspondientes a 0, 25, 50, 75 y 100 kg/ha de K. De forma general la función que se ajusto mejor a las tendencias de las ecuaciones fue la lineal y en algunos otros la polinomial de segundo grado.

### **4.2.1 Respuestas del trigo**

Teniendo en cuenta la respuesta presentada por el cultivo de trigo a la fertilización potásica, comparando en este caso, lo obtenido en la Granja Gredos (Yvype) y en la Granja Weaver (Chiriguelo), se puede constatar (figura 4) que la mayor productividad se verifico en la colonia Yvype (Granja Gredos) con rendimientos de máxima eficiencia técnica de 2.181 kg/ha de trigo, con diferencia de 452 kilos más con respecto al mayor rendimiento en la Granja Weaver (Chiriguelo), dicho valor se obtuvo aplicando 60 kg/ha de K, del mismo modo, fueron calculados las dosis de máxima eficiencia económica y la máxima eficiencia económica con valores de 56 y 1.963 kg/ha. Asimismo se puede apreciar que sin la aplicación del fertilizante potásico el rendimiento obtenido fue de 1.706 kg/ha en Yvype y 1.554 en la localidad de Chiriguelo. En las dos áreas experimentales la tendencia con mejor ajuste correspondió a la cuadrática.

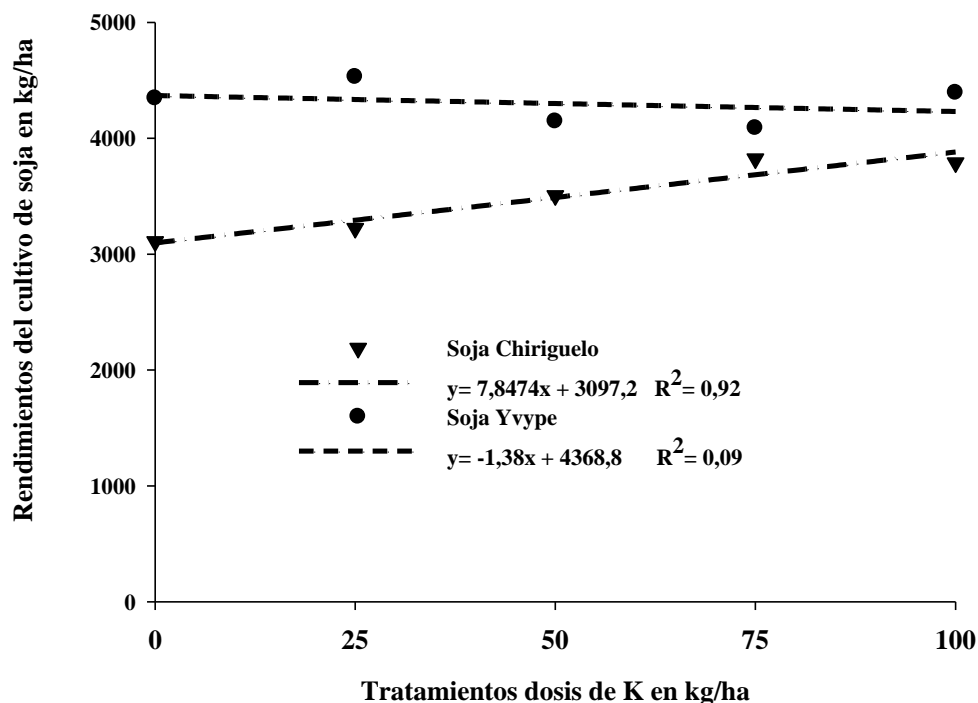


**Figura 4.** Producción de granos de trigo, en función a la aplicación de dosis crecientes de potasio.

#### 4.2.3 Respuestas del cultivo de soja

Considerando el rendimiento de la soja en los diferentes tratamientos, con la aplicación de dosis crecientes de potasio en las dos parcelas experimentales instalados, se tiene, que en las dos áreas la ecuación se ajusto a una lineal, registrándose respuestas positivas en la Granja Weaver (Chiriguelo) y negativas en la Granja Gredos (Yvype), es decir, en el área experimental situado en Chiriguelo se ajusto una ecuación con tendencia lineal positiva y negativa en Yvype. Sin la fertilización potásica se obtuvo rendimientos de 3.857 y 3.097 kg/ha de soja en Yvype y Chiriguelo respectivamente. Se puede observar que aun no presentando respuestas a la fertilización potásica en la granja Gredos, de igual manera se obtuvo mejores rendimientos en esa área comparado con lo registrado en la Granja Weaver. No obstante hubo una tendencia de mas respuesta en la Granja Weaver, donde, en la misma se observa que el cultivo presento una respuesta ascendente a la fertilización, es decir, a medida que se fueron aumentando las dosis del K el rendimiento aumenta progresivamente.



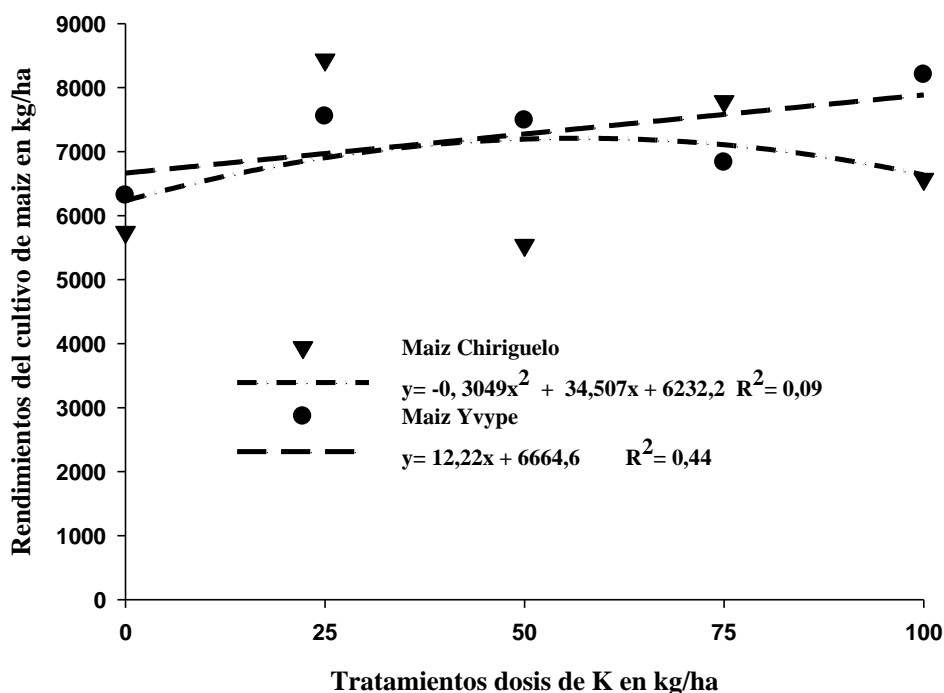


**Figura 5.** Producción de granos de soja, en función a las dosis de potasio aplicados.

#### 4.2.3 Respuestas del cultivo de maíz

Teniendo en cuenta la producción del maíz, en las dos parcelas experimentales instaladas, influenciados en este caso, por las dosis crecientes de potasio, se puede mencionar que las mismas presentaron altas respuestas a la fertilización potásica con rendimientos muy buenos en ambas parcelas, donde en la Granja Weaver (Chiriguelo), al considerar la relación existente entre las dosis de K aplicadas y el rendimiento del maíz en ella, la ecuación calculada permitió ajustar una función cuadrática o polinomial de segundo grado, donde la máxima producción o la máxima eficiencia técnica se alcanzó con la dosis de 57 kg/ha de K, obteniéndose con ella un rendimiento de 7.221 kg/ha de maíz, siendo que, el rendimiento de la parcela sin fertilización potásica consiguió un valor de 6.229 kg/ha de maíz. No obstante en la Granja Gredos (Yvype), la tendencia de la ecuación fue una lineal positiva, donde, la misma nos indica que, el maíz presentó una respuesta altamente positiva a la fertilización, donde a medida que se fueron aumentando las

dosis el rendimiento tenía un crecimiento ascendente, mientras que, el rendimiento del maíz sin la aplicación del fertilizante potásica fue de 6.664 kg/ha.



**Figura 6.** Producción de granos de maíz, en función a las dosis de potasio aplicados.

#### 4.3 Calibración de análisis de suelo

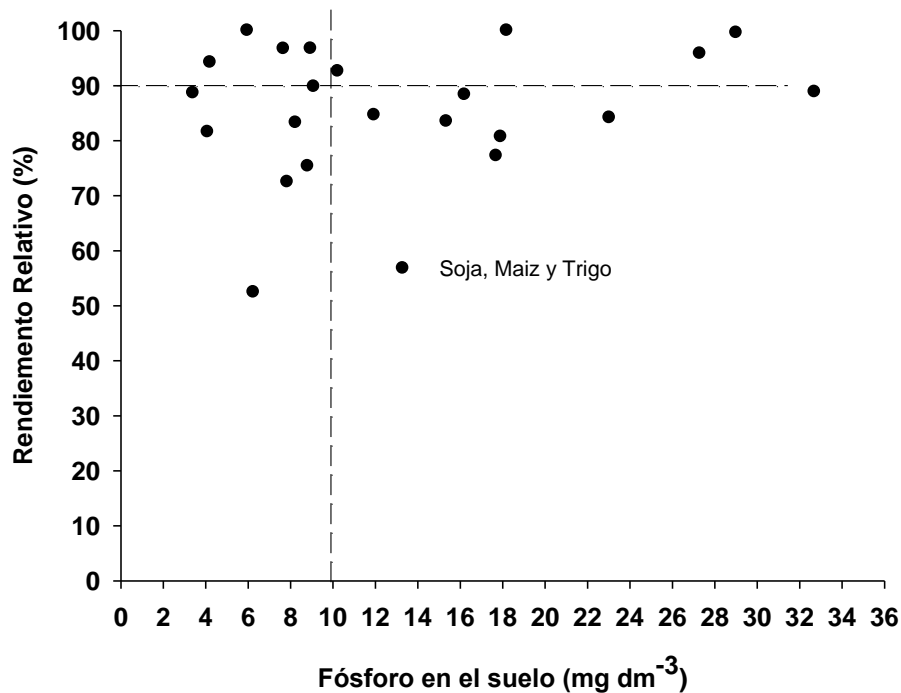
En este punto son analizadas la construcción de los niveles de P y K en el suelo, así como el punto crítico para la respuesta a la fertilización fosfatada y potásica y también los niveles de fertilidad. Durante el proceso de calibración del análisis de suelo, utilizando el extractante Mehlich<sup>-1</sup>, fueron establecidos la relación entre el valor del análisis de suelo de la muestra compuesta que es representativa del área experimental, siendo la misma tomada antes de la instalación del experimento, y la respuesta del cultivo expresada en porcentaje de la producción máxima (rendimiento relativo).

El nivel crítico de los nutrientes (P y K) en el suelo es definido como la concentración por debajo del cual existe mayor o más alta probabilidad de respuesta a la fertilización. Es decir, cuando menor sea la concentración de P y K en el suelo con relación al nivel crítico establecido, mayor será la probabilidad de respuestas de

los cultivos a la fertilización. La respuesta máxima de los cultivos a la aplicación del nutriente en estudio es el principal criterio llevado en cuenta para la determinación del nivel crítico, donde se tiene un valor numérico subjetivo, ya que, la misma puede variar con el uso de funciones alternativas. En este trabajo fue considerado el 90% de la máxima producción como punto de mayor retorno económico, donde con la misma se asume se obtendría el mayor retorno económico.

#### **4.3.1 Fósforo**

En la Figura 7, se observa la calibración del análisis de suelo para fósforo, en donde se representan la relación existente entre el rendimiento relativo de los cultivos en cada una de las zafras y la concentración de P en el suelo, teniendo en cuenta los resultados verificados en las dos áreas experimentales. En la misma se puede apreciar que no fue posible ajustar la curva de Mitscherlich y por ende no fue posible determinar los niveles de fertilidad para el P en el suelo, donde, el no ajuste puede ser atribuido a la alta dispersión de los datos obtenidos. Comparando este resultado con otros resultados obtenidos en trabajos de calibración, se puede mencionar que, un comportamiento parecido fue verificado por Barreto (2008) en un experimento similar llevado a cabo en la Colonia Raúl Ocampos Rojas, denominado como Chiriguelo (Campo experimental FCA-UNA). No obstante se pudo estimar un valor estimado para el nivel crítico considerando el 90% del rendimiento relativo de los cultivos.

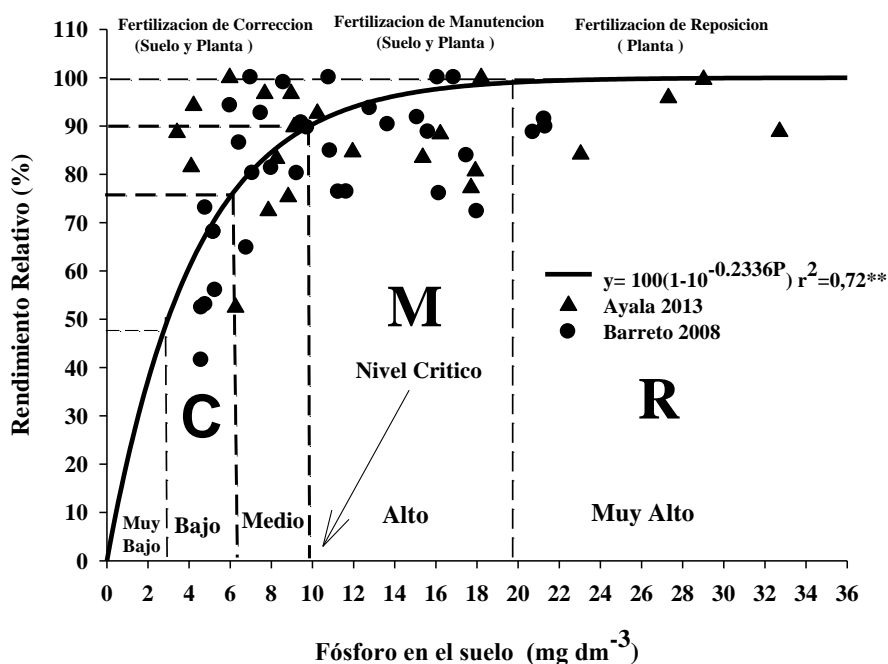


**Figura 7.** Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de fósforo en la camada superficial del suelo (0 –10 cm), extraído con Mehlich<sup>-1</sup>, último periodo de la investigación.

Como ya fue mencionado en capítulos anteriores, los trabajos experimentales de esta investigación vendrían a ser un seguimiento de los trabajos anteriores, en el que también fueron realizados trabajos de calibración abordándose en ellas los departamentos más representativos en cuanto a producción de granos bajo el sistema de siembra directa en nuestro país. En este caso, en esta tesis se enfatizó sobre los datos generados en las áreas experimentales situadas en el Distrito de Pedro Juan Caballero, con el objetivo de crear una tabla de recomendación específica para el Departamento de Amambay. En este sentido, con el propósito de entender mejor los datos obtenidos en la tesis actual y con el objetivo de aumentar el banco de datos y darle mayor confiabilidad a los resultados obtenidos en esta investigación, en este punto, son presentados los datos de las dos etapas del proyecto de investigación, es decir, a los datos generados en esta etapa, le fueron integradas los datos de Barreto (2008).

De tal forma se observa en la figura 6, la fusión de los datos, donde el nivel crítico encontrado para el P fue de 10 mg dm<sup>-3</sup>, en este caso, se espera que los valores

que estén por debajo del valor del nivel crítico presenten mayor probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada. Comparando este resultado con los trabajos anteriores llevados a cabo en el Departamento, se puede mencionar que la misma presentó un comportamiento similar con lo verificado en las etapas anteriores, donde, relacionando con el nivel crítico obtenido por Barreto (2008), al integrar sus datos con los de Cubilla (2005), se tiene que, el nivel crítico calculado fue de  $11 \text{ mg dm}^{-3}$ , valor más o menos igual a lo registrado en la tesis actual. La diferencia puede atribuirse a que, en la tesis actual se tuvo en cuenta o se contaron con más datos, concernientes a dos áreas experimentales de esta investigación, además de la fusión de los datos generados en las etapas anteriores, con los que se fueron ajustando el nivel crítico. De igual forma se puede apreciar en la Figura 6 un valor de  $R^2$  con 0,72, que nos indica en porcentaje un buen ajuste de los datos. A partir del nivel crítico fueron calculados las fajas o niveles de fertilidad para el fósforo.



**Figura 8.** Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de fósforo en la camada superficial del suelo (0 –10 cm), extraído con Mehlich<sup>-1</sup>, datos generados en los dos periodos de la investigación.

#### 4.3.1.1 Determinación de los niveles de fertilidad para fósforo

Una vez que se estableció el nivel crítico para el fósforo, se procedió a definir cada nivel de fertilidad con relación a la curva de respuestas, en este sentido el nivel crítico fue calculado considerando el 90% del rendimiento relativo sobre la abscisa, y partir del mismo fueron definidos los diferentes niveles, es decir, el nivel crítico dividido por tres permitió establecer los niveles equidistantes para las clases “muy baja”, “baja” y “media”. La clase “alta” se encuentra comprendida entre el nivel crítico y el nivel crítico multiplicado por dos. A partir del límite superior de la clase “alta” inicia la clase “muy alta”.

**Tabla 4.** Fajas de fertilidad de fósforo en el suelo, extraído por el método de Mehlich<sup>1</sup>, considerando los datos generados en los dos periodos de la investigación

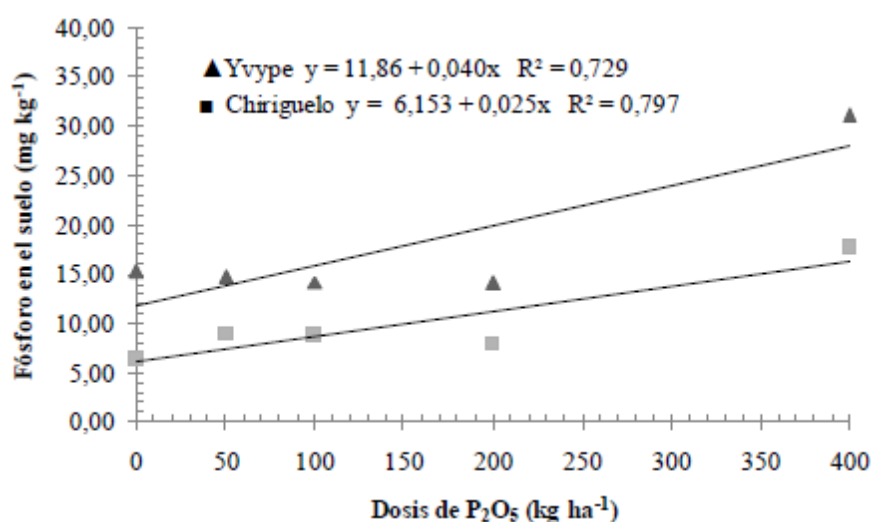
Fajas de fertilidad	Concentración de fosforo en el suelo (mg dm <sup>-3</sup> )
Muy bajo	0 – 3,3
Bajo	3,4 – 6,6
Medio	6,7 – 10
Alto	11 - 20
Muy alto	>20

#### 4.3.1.2 Fertilización para corregir la concentración de fósforo en el suelo

La aplicación de dosis crecientes del fertilizante fosfatado genero cambios en cuanto a la concentración de fósforo en el suelo. En este sentido conociendo la relación entre la cantidad del fertilizante aplicado y la concentración de fósforo en el suelo, fue posible calcular cuántos kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se necesita aplicar para elevar 1 mg dm<sup>-3</sup> de P en el suelo, y de ahí, se pudo estimar la cantidad de P que es necesario adicionar para elevar su concentración hasta el nivel crítico.

De tal forma, se puede apreciar en la figura 7, que hubo un aumento proporcional de concentración de P en el suelo conforme a la adición de las dosis del fertilizante fosfatado, donde el aumento, fue mayor en Yvype con relación a lo

registrado en Chiriguelo. Cabe mencionar que ambas áreas presentaron diferencias en cuanto a la cantidad inicial de P en el suelo, siendo la misma mayor en Yvype. Asimismo se puede observar que, por cada 100 kg/ha de P aplicado, se produjo un aumento de  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  en la Granja Gredos (Yvype), mientras que, en la Granja Weaver (Chiriguelo), solamente fue de  $2,5 \text{ mg dm}^{-3}$ . Enfatizando al trabajo realizado por Cubilla 2005, se puede mencionar que, sus resultados fueron más o menos similares a lo registrado en la Granja Gredos, donde, se detecto un aumento de  $3,7 \text{ mg dm}^{-3}$  de P por cada 100 kg/ha de fósforo aplicado, sin embargo, al compararlos con los datos de Barreto 2008, se verifica que sus resultados confieren mas con los registrados en la Granja Weaver, en el cual, se registró un aumento de  $2,4 \text{ mg dm}^{-3}$  de P en el suelo.



**Figura 9.** Relación entre la cantidad de P aplicado y su concentración el suelo, extraída con Mehlich<sup>1</sup>, último periodo de la investigación

La Tabla 5, presenta la ecuación que expresa la relación entre la cantidad del fertilizante fosfatado aplicado y la concentración de P en el suelo, así como los coeficientes de determinación para cada área instalada y la cantidad de fertilizante que es necesario aplicar para elevar la concentración de P en el suelo a  $1 \text{ mg.dm}^{-3}$ . En este sentido, se puede apreciar que, en promedio se debe aplicar 32,5 kg/ha de P para elevar  $1 \text{ mg.dm}^{-3}$  de concentración de fósforo en los suelos del Departamento de Amambay, sin embargo se puede constatar, que entre las dos parcelas experimentales existe una diferencia de 15 kg/ha, es decir, se debe de aplicar 15 kilos a mas en Chiriguelo para elevar la concentración de P en el suelo, comparado el mismo con

Yvype, tal diferencia se le puede atribuir a la concentración inicial de fósforo en el suelo. En trabajos similares, Cubilla (2005) encontró que, para elevar  $1 \text{ mg.dm}^{-3}$  de P en el suelo, hace falta aplicar 27 kg/ha de fósforo, mientras que, en el trabajo de Barreto (2008) el valor encontrado fue de 40 kg/ha, cabe mencionar que estos trabajos fueron conducidos en el mismo lugar, es decir, en el Campo Experimental de la UNA-FCA-PJC.

**Tabla 5.** Ecuación que expresa la relación entre cantidad de fertilizante fosfatado aplicado al suelo y la concentración de fósforo en el suelo, coeficiente de determinación y la cantidad de fertilizante que se debe aplicar para elevar a  $1 \text{ mg.dm}^{-3}$  la concentración de fósforo en suelos de Amambay, último periodo de la investigación.

Local del Experimento	Contenido de arcilla g/kg/ha	R <sup>2</sup> %	Ecuación	Necesidad de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> para elevar $1 \text{ mg dm}^{-3}$ de P kg/ha
Yvype	450	0,72	$y = 0,040x + 11,86$	25
Chiriguelo	500	0,79	$y = 0,025x + 6,15$	40
Media	475	0,75	$y = 0,0325x + 9,00$	32,5

En la Tabla 6, se aprecia la media general que se necesita aplicar para elevar  $1 \text{ mg.dm}^{-3}$  de P en el suelo, considerando los datos generados en los tres periodos de la investigación, asimismo se observa en ella la cantidad de arcilla de cada parcela experimental utilizado en las diferentes periodos en que fueron realizados los trabajos de investigación, el coeficiente de determinación y las ecuaciones generadas para cada una.



**Tabla 6.** Ecuación que expresa la relación entre cantidad de fertilizante fosfatado aplicado al suelo y la concentración de fósforo en el suelo, coeficiente de determinación y la cantidad de fertilizante que se debe aplicar para elevar a  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  la concentración de fósforo en suelos de Amambay, en cada periodo de la investigación.

Local del Experimento	Contenido de arcilla g/kg/ha	R <sup>2</sup> %	Ecuación	Necesidad de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> para elevar $1 \text{ mg dm}^{-3}$ de P kg/ha
Yvype	450	0,72	$y = 0,040x + 11,86$	25
Chiriguelo	500	0,79	$y = 0,025x + 6,15$	40
Cubilla 2005	560	0,98	$y = 0,037x + 4,94$	27
Barreto 2008	560	0,98	$y = 0,0244x + 12,43$	40
<b>Media</b>	517	0,87	$y = 0,0316x + 8,845$	32

En ese sentido, al analizar la Tabla 6, se puede constatar que, para elevar  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  de P en el suelo, es necesario aplicar en promedio  $32 \text{ kg/ha}$  de fertilizante fosfatado, siendo el mismo calculado a partir de las tres etapas juntos, es decir, de Cubilla (2005), Barreto (2008) y los datos de la tesis actual, asimismo es apreciable que en cada una de las etapas se registraron resultados diferentes en cuanto a las necesidades de P para elevar su concentración en el suelo, donde la menor cantidad se verificó en la Granja Gredos (Yvype), tal caso, puede atribuirse entre otras cosas al historial de fertilización con lo que cuenta el mismo. Mediante esta tabla se puede definir la estrategia de fertilización para corregir o elevar la concentración de fósforo en el suelo hasta el nivel crítico deseado.

#### **4.3.1.3 Recomendaciones preliminares para el fósforo en el Departamento de Amambay**

En esta sección se presenta una propuesta preliminar de fertilización a base de fósforo, para los cultivos de trigo, soja y maíz, en este caso, considerando los tres periodos o etapas de investigación. De tal forma, en este trabajo la propuesta de recomendación tiene como fin una fertilización correctiva para los niveles que se

encuentran por debajo del nivel crítico y de manutención para el nivel que se encuentran por encima del mismo, siendo en este punto el nivel alto, no obstante, para el nivel muy alto ya no habrá necesidad de aplicar ni la dosis de manutención.

En este sentido se puede optar por una fertilización correctiva gradual integrada por una de manutención o por la aplicación correctiva total en una vez, es decir, con una sola etapa de fertilización. El principal propósito de calcular estas dosis de corrección, sería que, al aplicar esas dosis se pueda alcanzar el nivel crítico deseado, para el nutriente fósforo. Las dos propuestas de fertilización correctiva son detalladas en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Propuesta preliminar de recomendación de fósforo para trigo, soja y maíz en sistema de siembra directa en el Departamento de Amambay

Clases	Recomendaciones para tres cultivos			Corrección total
	1 <sup>o</sup> cultivo	2 <sup>o</sup> cultivo	3 <sup>o</sup> cultivo	
	-----kg/ha-----			
<b>Muy bajo</b>	105 + M	63 + M	43 + M	211 + 3M
<b>Bajo</b>	52 + M	32 + M	21 + M	105 + 3M
<b>Medio</b>	32 + M	M	M	32 + 3M
<b>Alto</b>	M	M	M	3M
<b>Muy alto</b>	0	0	0	0

M= Manutención (R x 1,25). El factor 1,25 corresponde a posibles pérdidas de nutrientes del sistema de manejo

R= reposición (exportación de los cultivos). El valor R de los cultivos son: trigo:10 kg de P, maíz: 8 kg de P, soja : 12 kg de P por toneladas de granos producidos.

Como ya fue mencionado más arriba, esta propuesta de fertilización tiene por finalidad aplicar dosis correctivas de fertilizantes fosfatados para elevar los niveles de concentración de fosforó al nivel crítico o a niveles considerados adecuados para que los cultivos puedan expresar su máximo potencial productivo, sin tener en cuenta otros factores que `podrían llegar a ser limitantes. En este sentido, para la fertilización correctiva gradual, las dosis fueron calculadas en base a tres zafra de cultivos, es decir, para tres cultivos en sucesión. Para el caso, los valores de las dosis de corrección de los niveles muy bajo y bajo, fueron obtenidos multiplicándose, la cantidad de P que se necesita para elevar su concentración a  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  en el suelo,

en este caso considerando el valor promedio obtenido a partir de las tres etapas, por el valor que fue estimado por la diferencia entre el valor del nivel crítico y el valor superior del nivel en cuestión (Comissão, 2004). De tal forma, para la aplicación gradual de las dosis calculadas en los tres cultivos, las mismas fueron divididas en tres porciones o tres etapas, siendo aplicado un 50% en el primer cultivo, 30 en el segundo y 20 en el tercero.

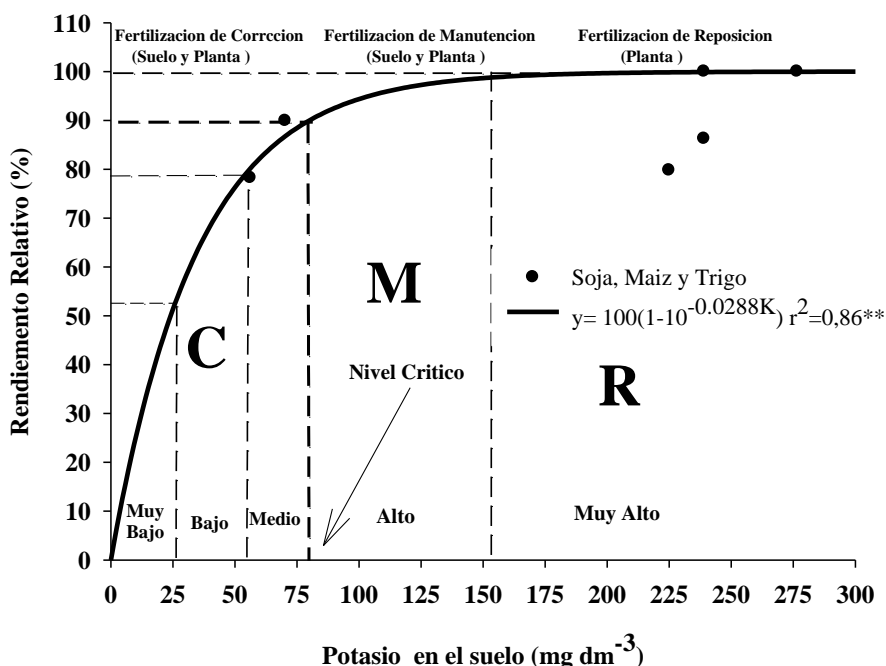
Ya en el nivel medio, fue calculado aplicar una dosis de 32 kg/ha de fósforo, recordando que el mismo solo es recomendado para el primer cultivo, siendo que, para los cultivos posteriores solo se aplicarían las dosis de manutención. En el caso del nivel alto solo serán aplicadas las dosis de manutención, mientras que para el nivel muy alto ya no compensaría aplicar ninguna de las dosis, ni siquiera las de manutención, considerando que el citado nivel presenta alta reserva del nutriente para el desarrollo de las plantas. Una vez alcanzado el nivel alto, el objetivo sería, el de mantenerse en ese nivel, ya que el límite inferior del mismo coincide con el nivel crítico, donde se estima se obtienen los rendimientos más próximos a la máxima eficiencia económica de los cultivos, en este caso, la fertilización correspondería únicamente a la de manutención, debiendo ser la misma en cantidades suficientes para reponer las cantidades exportadas por los cultivos o por los eventuales pérdidas que pueden sufrir.

#### **4.3.2 Potasio**

En esta sección serán discutidos los resultados obtenidos con la calibración de análisis de suelo para el K, donde, para el efecto serán considerados los puntos generados en las dos áreas experimentales, es decir, lo registrado en la granja Agrícola Gredos así como lo verificado en la Granja Weavaer. Cabe mencionar que además de los datos actuales, a las mismas serán integrados los datos de Barreto (2008) con el propósito de aumentar el banco de datos y por ende darle mayor confiabilidad a la calibración generada, donde, la diferencia que existe entre las dos etapas es que, en la etapa actual se tuvo dos áreas experimentales brindando mayor cantidad de datos, mientras que, en la etapa anterior (2008), solo se contó con un área experimental.

En este sentido, se puede observar en la Figura 10, la representación de la relación que existe entre la cantidad de potasio en suelo y el rendimiento relativo de cada uno de los cultivos en las diferentes zafras, en este caso, de los cultivos de trigo, soja y maíz, destacando que los puntos observados en la Figura 10 fueron generados a partir de los datos obtenidos de las dos áreas experimentales, es decir, los datos de la Granja Gredos (Yvype) y los de la Granja Weaver (Chiriguelo). La ecuación ajustada para los resultados obtenidos, fue la de Mitscherlich, descrita por Raij (1.981), en este caso la curva nos describe la ley de los rendimientos decrecientes, en donde, el rendimiento de un cultivo aumenta conforme se incrementa las dosis de uno o más fertilizantes, sin embargo la misma llega a un punto en el cual, la aplicación de mas dosis de fertilizante ya produce una reducción en el rendimiento del cultivo.

De igual manera se observa el nivel crítico de potasio en el suelo, siendo este definido como la concentración por debajo del cual se tiene o existe mayor probabilidad de que un cultivo responda a la fertilización, en este caso, el nivel crítico encontrado fue de  $80 \text{ mg.dm}^{-3}$ , donde, cuando menor sea la cantidad de potasio en el suelo respecto al nivel crítico calculado, mayor será la probabilidad de respuesta de un determinado cultivo a la fertilización potásica, mientras que, para los niveles que estén por arriba del nivel crítico ya tienden a presentar menores respuestas a las fertilizaciones. El nivel crítico fue calculado considerando el 90% del rendimiento relativo de los cultivos en cuestión, donde, a partir del mismo fueron establecidos los diferentes niveles de fertilidad para cada porción de la curva, sobre los cuales se pueden realizar las estrategias de fertilización, en este caso, para los niveles muy bajo, bajo y medio son aplicados las dosis consideradas correctivas, mientras que, a partir de los niveles alto y muy alto son aplicadas las fertilizaciones consideradas de mantenimiento y reposición. Asimismo se un observa en la figura un  $R^2$  con 0,86, valor que nos indica una buen ajuste de los datos.

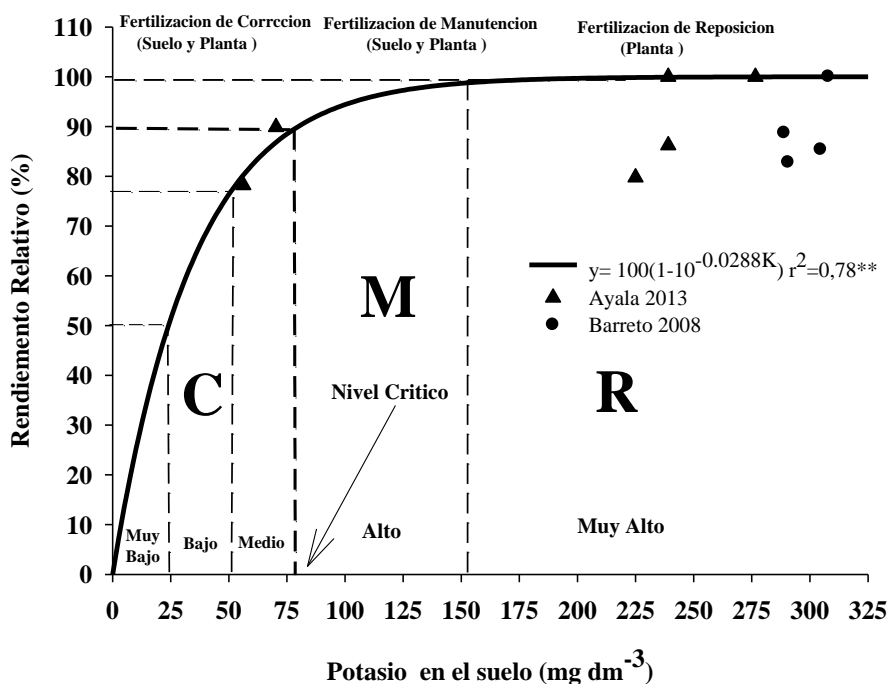


**Figura 10.** Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de potasio en la camada superficial del suelo (0 –10 cm), extraído con Mehlich<sup>-1</sup>, último periodo de la investigación.

Con el objetivo de aumentar el banco de datos generado en esta investigación, y por ende darle mayor confiabilidad, fueron integrados a esta tesis los datos registrados por Barreto (2008) en un trabajo de investigación similar, de tal forma, se tuvo en cuenta tres áreas experimentales. La integración de estos datos fue fundamental y de gran importancia para este trabajo, ya que, además de generar más puntos para una mejor calibración, ayudan a sostener los datos actuales y fortalecer los anteriores.

Considerando lo mencionado, se observa en la Figura 11 la relación existente entre la cantidad de potasio en el suelo y los rendimientos relativos de cada cultivo, juntando las dos etapas. De tal forma, se puede observar en la figura, que el nivel crítico calculado fue de 77 mg.dm<sup>-3</sup>, estableciéndose este al considerar el 90% de rendimiento relativo. En trabajos anteriores de calibraciones realizados, considerando las zonas más representativas de producción de granos en nuestro país, el nivel crítico encontrado para el potasio fue de 75 mg.dm<sup>-3</sup> (Barreto, 2008), el cual comparando con lo registrado en esta investigación, recalando una vez más, que

solo fueron considerados los datos obtenidos en el Departamento de Amambay, se puede mencionar que, la misma presento también más o menos la misma tendencia, es decir, no hubo una variación tan pronunciada comparado con los resultados anteriores, donde, el nivel crítico calculado fue de  $77 \text{ mg dm}^{-3}$ .



**Figura 11.** Relación entre el Rendimiento Relativo de trigo, soja y maíz, y la concentración de potasio en la camada superficial del suelo (0 –10 cm), extraído con Mehlich<sup>-1</sup>, datos generados de los dos periodos de la investigación.

#### 4.3.2.1 Determinación de los niveles de fertilidad

Una vez definido el nivel crítico de potasio, se pudo detallar mejor cada porción de la curva, estableciéndose los niveles de fertilidad para el potasio, donde las mismas pueden ser establecidas a partir del rendimiento relativo (Raij et al, 1997). A partir del mismo, en este trabajo se opto por establecer los límites de las fajas de fertilidad a partir del rendimiento relativo. En este sentido, el 90% de rendimiento relativo estableció el nivel crítico sobre la abscisa; éste valor dividido por tres permitió establecer las fajas equidistantes para las clases “muy baja”, “baja” y “media”. La clase “alta” se encuentra comprendida entre el nivel crítico y el nivel crítico multiplicado por dos. A partir del límite superior de la clase “alta” inicia la clase

“muy alta”. Las cinco fajas de fertilidad determinadas son apreciables en las Figuras 10 y 11, y en las tablas 8 y 9.

En la Tabla 8 son detallados las fajas de fertilidad calculadas para la tesis actual, siendo la misma extraída por el método Mehlich<sup>-1</sup>, donde el nivel crítico encontrado para la etapa mencionada fue de 80 mg.dm<sup>-3</sup>.

**Tabla 8.** Fajas de fertilidad de potasio en el suelo, extraído por el método de Mehlich<sup>-1</sup>, último periodo de la investigación.

Fajas de fertilidad	Concentración de potasio en el suelo(mg dm <sup>-3</sup> )
<b>Muy bajo</b>	<b>0 – 26,6</b>
<b>Bajo</b>	<b>27 – 53,3</b>
<b>Medio</b>	<b>54 - 80</b>
<b>Alto</b>	<b>81 - 160</b>
<b>Muy alto</b>	<b>&gt;160</b>

Del mismo modo, en la Tabla 9, son representadas las fajas o niveles de fertilidad para el potasio, con los datos ya fusionados con los de Wendling 2005 y Barreto 2008, donde el nivel crítico determinado fue de 77 mg.dm<sup>-3</sup> de potasio, lo cual nos indica que, a medida que se tiene, mas cantidad de datos, el nivel crítico se va ajustando. A partir, de las creaciones de los diferentes niveles de fertilidad se pudo calcular, cuantos kilogramos de potasio se tiene que aplicar en cada uno de ellos para de tal forma alcanzar el nivel crítico.

**Tabla 9.** Fajas de fertilidad de potasio en el suelo, extraído por el método de Mehlich<sup>-1</sup>, datos generados en los dos periodos de la investigación.

<b>Fajas de fertilidad</b>	<b>Concentración de potasio en el suelo(mg dm<sup>-3</sup>)</b>
<b>Muy bajo</b>	<b>0 – 25,66</b>
<b>Bajo</b>	<b>26 – 51,3</b>
<b>Medio</b>	<b>52 – 77</b>
<b>Alto</b>	<b>78 – 154</b>
<b>Muy alto</b>	<b>&gt;154</b>

#### **4.3.2.2 Fertilización para corregir la concentración de potasio en el suelo**

Las aplicaciones de dosis crecientes de potasio, genero cambios en cuanto a la concentración del citado nutriente en el suelo, donde, por cada kg/ha de K<sub>2</sub>O potasio aplicado hubo un aumento proporcional en cuanto a su concentración en el suelo. En este sentido, se pudo estimar la cantidad de potasio en kg/ha que es necesario aplicar para elevar su concentración a 1 mg.dm<sup>-3</sup> en el suelo, donde, cabe mencionar, que para esta investigación, a partir de la segunda zafra, las cantidades de potasio en el suelo, superaron muy ampliamente el nivel crítico encontrado con los valores de 80 o 77 mg dm<sup>-3</sup>, alcanzando o sobrepasando hasta los niveles muy altos. Considerando lo mencionado, en esta tesis se opto por estimar un valor tentativo de la cantidad de K<sub>2</sub>O que es necesario aplicar para elevar su concentración en el suelo, teniendo en cuenta en este caso, la cantidad de potasio encontrado en la zafra de trigo 2009, donde fue calculado que por cada 100 kg/ha de K aplicado, el nivel de potasio aumentaba un 54,8 mg dm<sup>-3</sup>. De esa forma, el valor estimado para elevar 1 mg.dm<sup>-3</sup> de potasio en el suelo fue de 1,82 kg/ha de K.

A partir del valor estimado fue posible establecer una propuesta preliminar de fertilización correctiva de potasio para el departamento de Amambay, recalcando una vez más, que solo fueron utilizados los datos de la tesis actual, específicamente de la zafra 2009 del trigo, ya que, en las zafras posteriores y mismo en las etapas anteriores (Barreto, 2008), la concentración de potasio en el suelo ya sobrepasaba los límites de la clase muy alto. Estos hechos indican la alta respuesta que presenta el suelo de la región a la fertilización potásica.



### 4.3.2.3 Recomendaciones preliminares para potasio en el Departamento de Amambay

Aquí son presentados las propuestas de recomendaciones preliminares de potasio para los suelos del Departamento de Amambay, donde, el objetivo de esta recomendación es la de realizar una fertilización correctiva para alcanzar el nivel crítico del mismo. En este sentido, se puede optar por aplicar una fertilización correctiva gradual o una fertilización correctiva de una sola vez, ambas propuestas son descritas en la tabla 10. Para el caso de potasio, la cantidad de  $K_2O$  necesario para elevar su concentración en el suelo a  $1 \text{ mg.dm}^{-3}$  fue de  $1,82 \text{ kg/ha}$ , no obstante, en esta investigación la misma fue considerado como  $2 \text{ kg/ha}$ .

Las recomendaciones son orientadas a partir de los niveles de potasio encontrados en el suelo, los cuales son interpretadas o divididas en categorías. El objetivo principal de este sistema de recomendación es elevar los niveles de potasio en lo mínimo al nivel crítico y mantenerlo si fuere posible por encima del mismo.

**Tabla 10.** Propuesta preliminar de recomendación de potasio para trigo, soja y maíz en sistema de siembra directa en el Departamento de Amambay.

Clases	Recomendaciones para tres cultivos			Corrección total
	1 <sup>o</sup> cultivo	2 <sup>o</sup> cultivo	3 <sup>o</sup> cultivo	
	-----kg/ha-----			
<b>Muy bajo</b>	52 + M	31 + M	20 + M	103 + 3M
<b>Bajo</b>	26 + M	15 + M	10 + M	51 + 3M
<b>Medio</b>	2 + M	M	M	2 + 3M
<b>Alto</b>	M	M	M	3M
<b>Muy alto</b>	0	0	0	0

M= Manutención ( $R \times 1,25$ ). El factor 1,25 corresponde a posibles pérdidas de nutrientes del sistema de manejo. R= reposición (exportación de los cultivos). El valor R de los cultivos son: trigo y maíz 6 kg de K, soja : 20 kg de K por toneladas de granos producidos.

Esta propuesta de fertilización tiene como propósito aplicar dosis correctivas de fertilizantes potásicas para elevar los niveles de concentración del mismo hasta el nivel crítico. En este sentido, para la fertilización correctiva gradual, las dosis fueron calculadas en base a tres zafas de cultivos, es decir, para tres cultivos en sucesión de

trigo, soja y maíz. Para el caso, los valores de las dosis de corrección de los niveles muy bajo y bajo, fueron obtenidos multiplicándose, la cantidad de K que se necesita para elevar su concentración a  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  en el suelo, por el valor que fue estimado por la diferencia entre el valor del nivel crítico y el valor superior del nivel en cuestión (Comissão, 2004). De tal forma, la aplicación gradual de las dosis calculadas para los tres cultivos, consistieron en las aplicaciones divididas en tres porciones o tres etapas de aplicación, siendo aplicado en un primer momento un 50% en el primer cultivo, 30% en el segundo y 20% en el tercero.

A partir del nivel alto solo son aplicadas las dosis de manutención o reposición, de manera a reponer el potasio que pueda perderse por uno u otro factor y las exportadas por los cultivos. En el caso del nivel muy alto, ya no corresponde aplicar ni las dosis de manutención, ya que, en el mismo los niveles ya están arriba del doble del nivel crítico, aunque el mismo ya dependerá de cada productor, es decir, de condición económica, ya que el mismo puede optar por aplicar las dosis de reposición, para reponer la cantidad de K exportada por los cultivos.

## 5 CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

De forma general, los cultivos de trigo, soja y maíz respondieron a las aplicaciones de fertilizantes fosfatados y potásicos, donde, el grado de respuestas estuvo directamente influenciado por el historial de fertilización de las áreas experimentales instaladas, es decir, de la concentración inicial de fósforo y potasio en el suelo.

Para el nutriente fósforo, el nivel crítico encontrado fue de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ . En promedio para elevar  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  de P en el suelo fue necesario aplicar  $32 \text{ kg/ha}$  de fertilizante fosfatado, donde, para alcanzar el nivel crítico, considerando los niveles que están por debajo del mismo, es decir, los niveles muy bajo y bajo fueron necesarios aplicar 211, 105 de P respectivamente, mientras que para el nivel medio es necesario aplicar  $32 \text{ kg/ha}$  de P. Para los niveles altos y muy altos son recomendadas las dosis de reposición.

Para el potasio, el nivel crítico encontrado por el método de Mehlich<sup>-1</sup> fue de  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  para el último periodo de la investigación y de  $77 \text{ mg dm}^{-3}$  para los datos fusionados de los dos periodos. La cantidad requerida para elevar la concentración de potasio a  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  en el suelo fue de  $2 \text{ kg/ha}$  de K, en el cual, para alcanzar el nivel crítico, es recomendada aplicar  $103 \text{ kg/ha}$  de fertilizante potásica cuando el mismo se encuentre en el nivel muy bajo, 51 cuando este en el nivel bajo y  $2 \text{ kg/ha}$  para el nivel medio. A partir del nivel alto es recomendado aplicar las dosis para reponer la cantidad de K exportada por los cultivos y las posibles pérdidas del mismo.

Cuando el potasio se encuentra por encima del nivel alto, la fertilización potásica ya es opcional, es decir, va a depender ya de la condición económica de cada productor y de su predisposición para aplicación, sin embargo, al transcurrir de las zafas el suelo tendrá la necesidad de una reposición para de esa manera mantener su nivel de fertilidad.





## **6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDA. 2000. O uso de Fertilizantes Minerais e o Meio Ambiente. Sistema de Plantio Direto. Paris. 2000.

Anghinoni, I. 2007. Fertilidade do Solo. Fertilidade do Solo o seu Manejo em Sistema de Plantio Direto. 1ª Ed. SBCS Vicosa-Mina Gerais. BR.1017 p.

Aquino, B.F. O uso de fertilizantes e corretivos agrícolas e os impactos sobre o ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DE SOLO, 32., 2009, Fortaleza. Anais. Fortaleza: Tec. Treina, 2009. 1 CD-ROM.

Ayala, A. 2010. Base para recomendaciones de fertilizantes NPK para soja y maíz cultivados en sistema de siembra directa en el departamento de Amambay. Tesis Ing. Agr. Pedro Juan Caballero, PY, FCA. UNA. 98 p.

Barreto, F.U. 2008. Recomendações de fertilização fosfatada e potássica para as principais culturas de grãos sob sistema plantio directos no Paraguai. Dissertação Dr. Santa Maria, BR, Universidade Federal de Santa Maria.

Barreto, S. 2009. Bases para las recomendaciones de fertilizantes NPK en el cultivo de trigo (*Triticum sp*) cultivado en sistema de siembra directa en el Departamento de Amambay. Tesis (Ing. Agr.), Pedro Juan Caballero. Py: FCA/UNA.

Bernier, R. 2000. Diagnostico de la fertilidad del suelo. Argentina. Centro Regional de Investigación Remehue. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. 71 p.

Bissani, C.; Gianello, C.; Camargo, F.; Tedesco, M. 2008. Fertilidade dos Solos e Manejo da Adubação de Culturas. 2ª Ed. Porto Alegre. BR. 9-77p.

Bruulsema, T.; Reetz, H. 2009. Phosphorus Nutrition Of Corn. (en línea) Georgia, US: IPNI. Consultado 28 sep 2010. Disponible en: <http://www.ipni.net>

Ceretta, C. A; Souza, L; Pavinato, A. 2007. Fertilidade do Solo. Manejo da Adubação. 1ª Ed. SBCS Vicoso-Mina Gerais. BR.1017 p.

COMISSÃO DE QUIMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul, 394 p., 2004.

Chaves, A. P; Oba, C. A. 2004. Criticas ao Modelo Brasileiro de Fertilizantes Fosfatados de Alta Solubilidade. Rio de Janeiro. BR. CETEM/MCT. 25 p.

Cubilla, M. C. 2005. Calibração visando recomendações de fertilização fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio diretos no Paraguai. Tese Maestrado. Santa Maria, BR, Universidade Federal de Santa Maria. 167p.

Cubilla, M. M; Wendling, A; Eltz, FL.; Amado, T.J.C., Mielniczuk, J. 2012. Recomendaciones de fertilización para soja, trigo, maíz y girasol bajo el sistema de siembra directa en el Paraguay. Asunción, CAPECO. 88 p.

Dechen, A; Nachtigall, G. 2007. Fertilidade do Solo. Elementos Requeridos a Nutrição de Plantas. 1ª Ed. SBCS Vicoso-Mina Gerais. BR.1017 p.

Derpsch, R. 2008. Área bajo siembra directa em varios países. Disponible en, <http://www.rolfderpsch.com/siembradirecta.htm>. Consultado fecha 10/10/09.

Dominguez, A. V. 1989. Tratado de fertilizaación. 2da ed. Madrid. ES: mundi prensa. Pg 13

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 412p., 1999.

Ernani, P; Almeida, J; Dos Santos, F. 2007. Fertilidade do Solo. Potássio. 1ª Ed. SBCS. Viçosa - Mina Gerais, BR.1017 p.

Fatecha, A. 1999. Guía para la fertilización de cultivos anuales y perennes de la región oriental del Paraguay. Caacupé. Py. Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Ferreira Novais, R; Álvarez, V; Barros, N. Fontes, R; Cantarutti, R. Lima, J. 2007. Fertilidade do solo. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1017 p.

García, F. 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. Acassuso, Buenos Aires, AR: INPOFOS Cono Sur.

Granada, J. A. 2010. Calibración de fertilización fosfatada de trigo, soja y maíz cultivados en siembra directa en dos suelos del Departamento de Caaguazú. Tesis Ing. Agr. San Lorenzo, Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial, CIA, FCA, UNA. 57 p.

González, D. 2010. Fertilización de N, P Y K Para el cultivo de soja (*Glycine max* L), maíz (*Zea mays*) y trigo (*Triticum sp*) en el sistema de siembra directa en el departamento de Amambay (Tesis de Grado). Py

Köeppen, W. 1931. Grundriss der klimakunde. En línea. De Gruiter, Berlin, 388 p.  
Inzunza, J. 2005: [www2.edec.cl/meteo/meteo.htm](http://www2.edec.cl/meteo/meteo.htm), Cap 15.

López, O. et al. 1995. Reconocimiento de Suelos y Capacidad de Uso de las Tierras; Región Oriental. Paraguay. MAG/Dirección de Ordenamiento Ambiental. Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra. Convenio 3445 P.A– Banco Mundial. 28 p.

Miranda, E. 2005. Sistema de Siembra Directa. Cuba. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos30/siembradirecta.shtml>. Consultado fecha 20/09/09.

POTAFOS (1996). Arquivo do Agrônomo. Nro 10/96. Nutri – Fatos. Informações agronômicas sobre nutrientes para as culturas.

Raij, B. Van. 1991. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba. BR: Ceres, Portafos. 343 p.

Raij, B. Van; Cantarella, H.; Quaggio, J.; & Furlani, A. 1997. Recomendações de adubação de calagem para o estado de São Paulo. Campinas, Br. Instituto Agronomico de Campinas.



Rodríguez, A. 2010. Niveles de fertilidad para fósforo y fertilización potásica y nitrogenada en el cultivo del trigo (*Triticum sp*) en sistema de siembra directa en el Departamento de Amambay. Tesis Ing. Agr. Amambay. CIA, FCA, UNA.. 53 p.

Sánchez, J. 2007. Fertilidad del suelo y Nutrición mineral de plantas. Disponible en: <http://www.cervantesvirtual.com>. Consultado fecha 10/10/09.

Santi, A.; L. 2007. Manejo do solo utilizando ferramentas da Agricultura de Precisão. (Tesis en Doctorado en Ciencias de Suelo). Br. Santa Maria.

Sá, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: Siqueira, J. O; Moreira, F. M. S.; Lopes, A. S.; Guilherme, L. R .G.; Faquim, V.; Furinato, A. E.; Carvalho, J. G. (eds.). Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Lavras: SBCS, 1999. p.267-319.

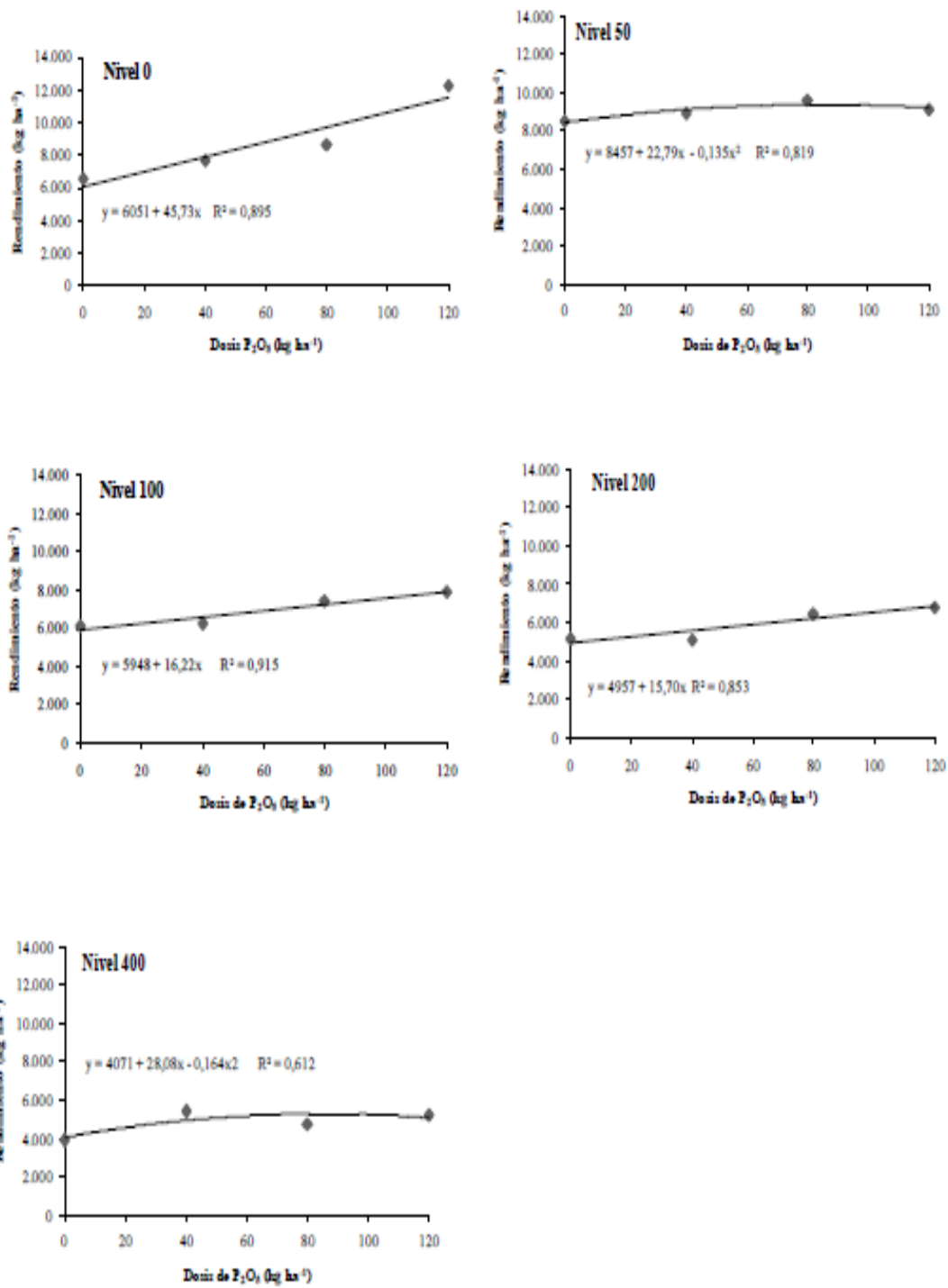
Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C. A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS/Departamento de Solos, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

Vitti, G. C. 1994. Métodos de evacuação da fertilidade do solo. São Paulo, BR: Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”. 40 p.

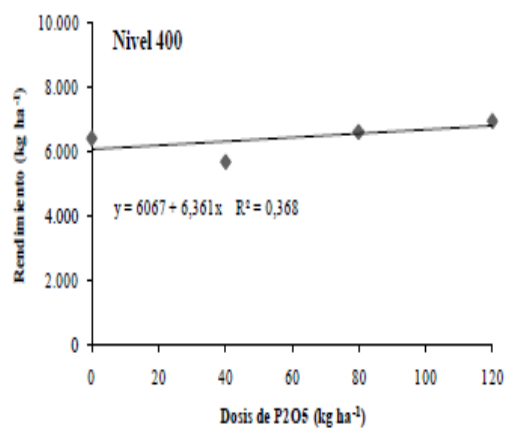
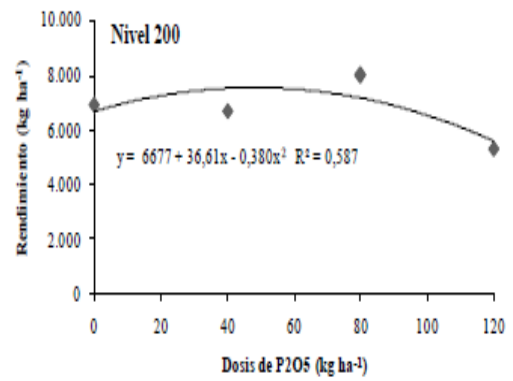
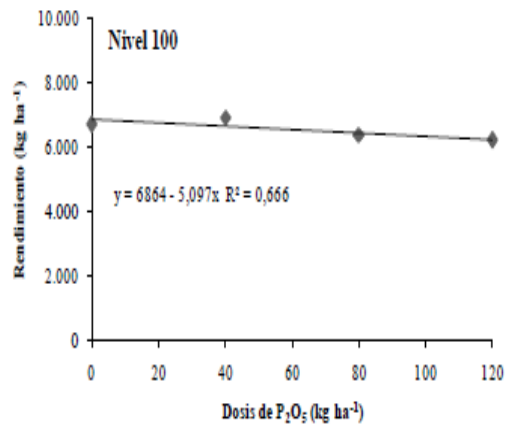
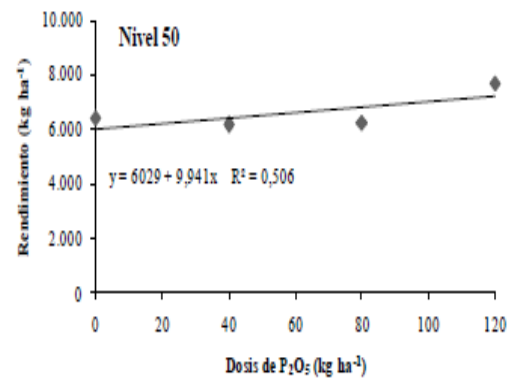
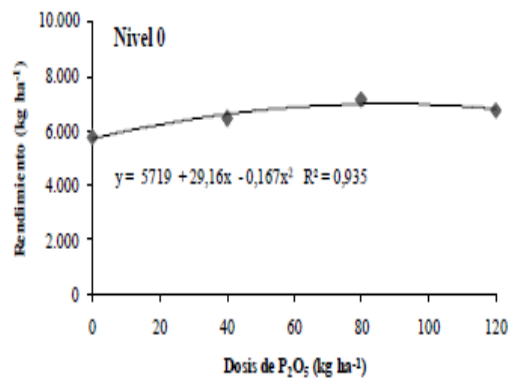
Wendling, A. 2005. Recomendação de nitrogênio e potássio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. Santa Maria, BR. Tese. Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. 124 p.

**Anexo 1.** Relación entre las dosis de  $P_2O_5$  aplicadas y los rendimientos de maíz en el Departamento de Amambay, localidades de Chiriguelo e Yvypé.

**Maíz Chiriguelo**

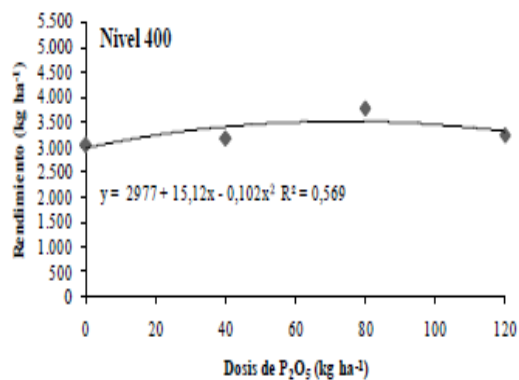
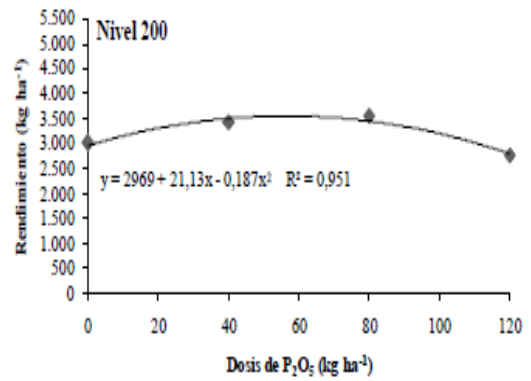
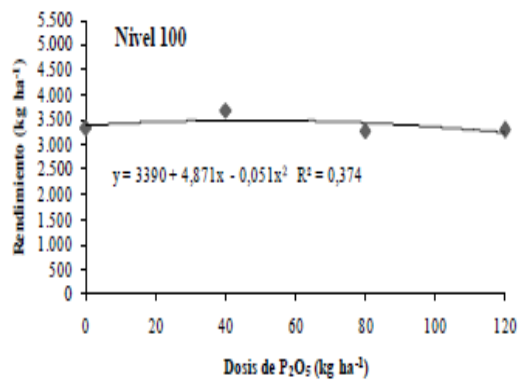
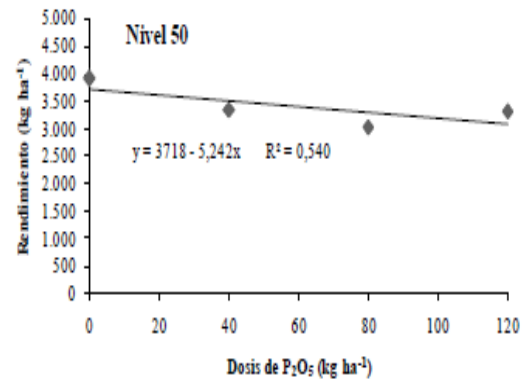
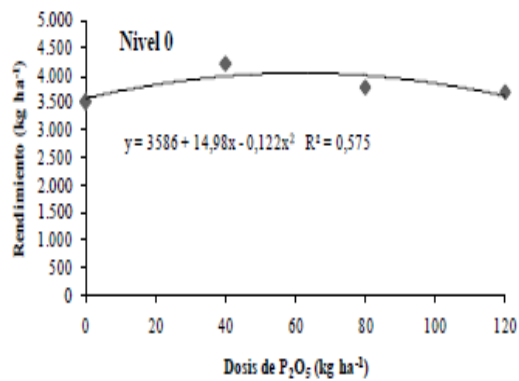


Maíz de Yvype



A 2. Relación entre las dosis de  $P_2O_5$  aplicadas y los rendimientos de soja en el Departamento de Amambay, localidades de Chiriguelo e Yvypé.

### Soja Chiriguelo



## Soja Yvype

