

Agricultura de precisión para la corrección de ambientes con elevado valor
de sodio intercambiable

*Trabajo final presentada para optar al título de Especialista de la Universidad de
Buenos Aires en Fertilidad de suelos y fertilización.
Área fertilidad de suelos y fertilización*

Gustavo Polak

Ingeniero Agrónomo - Universidad de la Republica - 2011

Lugar de trabajo: ADP (Agronegocios del Plata)



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Hugo Figueredo

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca)

JURADO DE TESIS

JURADO

Martín Torres Duggan

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magister en Ciencias del suelo (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Flavio H. Gutiérrez Boem

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy, (University of Kentucky, EE.UU.)

Fecha de defensa de la tesis: 21 de Octubre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todo el equipo de ADP (Agronegocios del Plata) y sobre todo al equipo de Agricultura por Ambientes de ADP; por el apoyo constante en la elaboración de este trabajo. También quiero agradecer a Marcos Guigou presidente de ADP por la posibilidad de desarrollar este trabajo en su establecimiento

A mi compañera de equipo María Noel Pérez por su colaboración el procesamiento de mapas e imágenes.

A la docente Ing. Agr. Monica Barbazan de la facultad de Agronomía (UDELAR) por el soporte técnico en este trabajo.

Al Ing. Agr. Hugo Figueredo, por su colaboración en discusiones y análisis de dicho trabajo.

Por último a mi familia, que me alentó siempre en mi formación como profesional.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 VARIABILIDAD EN LA CHACRA	8
2.1.1 Determinantes de la variabilidad espacial	8
2.2 ZONAS DE MANEJO	9
2.2.1 Agricultura de precisión	9
2.2.2 Medición y Análisis de la Variabilidad.....	10
2.3 MONITORES DE RENDIMIENTO	10
2.3.1 Información proveniente de imágenes	11
2.3.2 Análisis de Clusters y CART	11
2.3.3 Análisis geoestadístico	12
2.3.4 Planimetría y altimetría	13
2.3.5 UAV como herramienta en la delimitación de ambientes	13
2.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS.....	14
2.4.1 Definición de ambientes por propiedades químicas de los suelos	14
2.5 SUELOS SÓDICOS.....	15
2.5.1 Definición de suelos sódicos	15
2.5.2 Influencia de la sodicidad en los cultivos.....	15
2.5.3 Manejo de suelos sódicos	17
2.6 ÍNDICE DE VEGETACION DIFERENCIAL NORMALIZADO (IVND) COMO HERRAMIENTA.....	18
2.6.1 Definición de (IVND) y su capacidad para definir zonas de manejo	18
2.6.2 IVND como estimador de rendimiento	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	21

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO.....	21
3.1.1 Descripción del sitio de muestreo	21
3.1.2 Descripción de los principales suelos	22
3.2 AMBIENTACION DEL CAMPO EL BRAVIO	23
3.2.1 Mapa de Rendimiento	26
3.2.2 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (IVND)	27
3.2.3 Estudios Planimetricos y altimétricos	28
3.2.4 Análisis de imágenes multiespectrales y térmicas obtenidas en aviones no tripulados (UAV).....	29
3.3 DETERMINACIONES	31
3.3.1 Muestreo de suelos	31
3.3.2 Material corrector	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	41
6. RESUMEN.....	42
7. SUMMARY	42
8. BIBLIOGRAFIA	43

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la suba de los precios de los principales granos, y sobre todo de la soja, junto con el aumento del valor del capital tierra, ha despertado en los productores del mundo y del Uruguay la necesidad de producir cada vez más eficientemente, y obtener la mayor producción posible por superficie. Al mismo tiempo, tanto la preocupación por la sustentabilidad de los sistemas productivos, como por la contaminación ambiental impulsa a los empresarios rurales a buscar tecnologías, que maximicen la eficiencia de uso de los insumos en general, preservando el medio ambiente

La agricultura por ambientes o de precisión parece ofrecer soluciones a esta problemática.

El manejo de cultivos diferenciando por las características del ambiente de producción, tiene como objetivos reducir costos, aumentar la productividad y hacer un uso más eficiente de los insumos (Bongiovanni, 2004).

Mediante el conocimiento de la forma en que varían los rendimientos y el modo en que se relacionan con características intra-chacra, sería posible modificar el actual manejo uniforme de los cultivos hacia uno que considere los requerimientos específicos de cada sitio del campo. Así se realizaría lo necesario en el lugar y momento correctos, en la forma adecuada, lográndose mejorar los beneficios económicos y/o reducir el impacto en el ambiente (Plant, 2001).

En este marco el manejo de nutrientes y limitantes químicas de suelo toma un papel prioritario al ser los fertilizantes y enmiendas los principales costos de producción agrícolas, y por los potenciales riesgos de contaminación asociados a ellos.

Una de las limitantes de la producción de cultivos es la presencia de sodio (Na) en cantidades relativamente altas. Excepto en el cultivo de arroz, el Na es considerado un nutriente beneficioso para los cultivos, dentro de ciertos rangos. Hay especies adaptadas a la presencia de Na. Sin embargo, la mayoría de los cultivos de secano presentan cierto grado de susceptibilidad a este elemento.

Muchos trabajos muestran la efectividad de la aplicación de yeso para disminuir los efectos del problema de Na en el complejo de intercambio de cationes de los suelos Costa y Godz (1999) .

En Uruguay existen escasos estudios que relacionen el nivel del sodio en el suelo con el rendimiento de los cultivos.

Dada la superficie ocupada por este elemento en algunos de los suelos predominantes en la zona agrícola de Uruguay se planteó este trabajo, con el objetivo de realizar una caracterización y diferenciación de ambientes, y evaluar el impacto de la aplicación sitio-específica de yeso agrícola en los ambientes afectados por sodicidad.

Las hipótesis planteadas en este trabajo experimental fueron:

Hipótesis 1: la utilización de herramientas de agricultura de precisión (ejemplo, análisis de imágenes satelitales; monitores de rendimiento; relevamiento plani-altimétrico; sensores remotos montados en aviones no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle o UAV), entre otros permite diferenciar ambientes en base a su potencial de productividad.

Hipótesis 2: la aplicación de yeso agrícola en ambientes de bajo potencial, donde existen suelos con elevados niveles de Na intercambiable, pueden ser mejorados en su condición química (reducción del PSI).

El objetivo de este trabajo fue reducir los niveles de Na intercambiable en el suelo mediante la aplicación de yeso.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 VARIABILIDAD EN LA CHACRA

De acuerdo con Hatfield citado por Plant (2001) un sistema productivo está afectado por diversos factores, pero la variación que existe dentro de la chacra puede ser dividida en tres clases: (1) natural (e.g. variación de tipo de suelo), (2) aleatoria (e.g.: precipitaciones), (3) manejables (e.g.: fertilización o densidad de siembra). La interacción entre estas tres clases marcan las diferencias productivas entre distintos sitios específicos de una misma chacra (Bongiovanni, 2004).

En Uruguay, la agricultura de secano se caracteriza por presentar una alta variabilidad climática y de ambientes edáficos, que determinan considerables variaciones en rendimientos entre años y a su vez importantes diferencias en la respuesta vegetal dentro y entre chacras (Del Campo, 2007; Terra et al., 2010a). Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. La variación espacial se expresa en diferencias de producción en un mismo campo, en una misma zafra y en una misma cosecha (Mantovani et al., 2006; Roel y Terra, 2006b). A pesar de ello el manejo uniforme de los cultivos es generalizado, generando ineficiencias económicas y ambientales. Terra et al. (2010a)

2.1.1 Determinantes de la variabilidad espacial

Una vez encontrada la variabilidad se debe establecer una estrategia para manejarla. Desde el punto de vista técnico y económico, el cultivo se debe manejar según aquellas variables que tengan un alto efecto en la productividad, presenten mayor variabilidad y expliquen en mayor medida esa variabilidad en el rendimiento, siempre y cuando puedan ser controladas (Plant, 2001).

De todos los factores que afectan el rendimiento de los cultivos, se encuentran los que definen el potencial de rendimiento como el genotipo, la radiación solar y la temperatura ambiente; los que determinan el rendimiento logable, como el agua y nutrientes; y finalmente los reductores como malezas, enfermedades y plagas, que definen el rendimiento logrado (Soldini, citado por Otaño y Zarucki, 2010).

La variabilidad natural intrínseca de la chacra, es aquella atribuible al suelo, a variables geológicas y topográficas. Esta es estructural de la chacra, mientras que las medidas de manejo como fertilizaciones, densidad de siembra, rotación, etc pueden determinar variabilidad coyuntural dentro de la chacra.

En Uruguay, Ahunchain y Klaassen (1990) mencionan a la heterogeneidad del potencial del suelo como responsable de promedios de rendimientos bajos en cultivos y atribuyen las diferencias en potencial de producción a diferencias en los tipos de suelo y topografía.

2.2 ZONAS DE MANEJO

La consideración de la variabilidad dentro de las chacras que permite delimitar diferentes ambientes productivos es una de las metas actuales de los agricultores innovadores. Ello posibilita manejar cada zona según sus características, en lugar de usar los promedios, tratando de maximizar la productividad y rentabilidad en algunos casos y en otros priorizar la sustentabilidad (Bragachini, 2007).

Por su parte Terra et al. (2010a) define las zonas de manejo como sub-áreas dentro de la chacra donde se deberían expresar combinaciones relativamente similares de factores determinantes del rendimiento donde es apropiado un manejo homogéneo del suelo y los cultivos. Al respecto Webb y Loomis, Connor, citados por Otaño y Zarucki (2010) indican que los métodos de análisis de datos de rendimiento para determinar zonas, por lo general asumen que las mismas son limitadas por algún factor primario.

Según Miller et al., citados por Plant (2001), existen tres criterios básicos para la realización de un manejo sitio específico de una chacra: existencia de variabilidad en factores determinantes del rendimiento de los cultivos; que dicha variabilidad pueda ser identificada y cuantificada; y que esta información pueda ser usada para modificar el manejo con el fin de reducir el impacto ambiental y/o mejorar el beneficio económico. Por lo tanto, suponen que las diferencias en rendimiento entre zonas deben ser significativas y en ellas habría combinaciones homogéneas de factores que influyen en el rendimiento.

Terra et al. (2010a) plantean que para delinear zonas de productividad contrastante se deberían considerar los factores que influyen en variaciones sistemáticas de los cultivos y que las mismas pueden contener variantes según las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de los suelos utilizado, debiendo ser ajustadas en el tiempo.

2.2.1 Agricultura de precisión

Según Plant (2001) el principal objetivo del manejo sitio-específico es identificar el factor que en primer lugar afecta el rendimiento, siendo esa la principal limitante del sitio.

El manejo sitio-específico se ha transformado en un manejo por ambientes delineados a través del análisis de información surgida de monitores de rendimiento y diseñadas mediante la aplicación de la geoestadística que ha llevado a una disminución en los costos (Bongiovanni, citado por García, 2002).

Para delimitar ambientes, las diferencias en rendimiento deben ser mayores entre ambientes que dentro de ellos, y los factores que limitan el rendimiento deben ser los mismos dentro de un mismo ambiente. De esta forma, el número de ambientes óptimo es aquel que contempla el tamaño, variabilidad natural de la chacra y la practicidad del manejo que disminuya al máximo la varianza (Plant, 2001, Fraisee et al., citado por Roel y Terra, 2006c).

2.2.2 Medición y Análisis de la Variabilidad

En general, para definir ambientes se utiliza la información obtenida con planos planimétricos y altimétricos, monitores de rendimiento, imágenes satelitales y muestreo de suelos. Esta información se procesa utilizando métodos que incorporan la variabilidad espacial (geoestadística) y el análisis multivariado. Para ajustar la precisión y hacer un estudio más “preciso” de los ambientes recientemente se han incorporado tecnologías basadas en el montaje de cámaras, multiespectrales y térmicas, obtenidas a partir del uso de aviones no tripulados. Esto permite independizarse del clima para la obtención de imágenes, así como también obtener mayor resolución del pixel obtenido. Con el desarrollo de estas tecnologías se podría hacer un uso más “racional” de insumos como fertilizantes o enmiendas en ambientes delimitados.

2.3 MONITOR DE RENDIMIENTO

En una cosechadora con monitor de rendimiento, cada dato de rendimiento obtenido es representativo de un área correspondiente al ancho de la plataforma de la cosechadora y a la distancia recorrida por ésta en un tiempo dado (Bragachini et al., 2006).

El monitor de rendimiento es una herramienta que brinda información que luego se debe correlacionar con características físicas y químicas del suelo, distintos manejos anteriores, rotaciones y fertilización (Bragachini et al., 2006).

El objetivo es identificar y cuantificar el factor dominante para cada zona de la chacra. Se pueden obtener distintas zonas definidas por factores limitantes del rendimiento para luego ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas (Kravchenko y Bullock, 2000).

La generación de zonas de manejo a partir de mapas de rendimiento, sin embargo, ha sido cuestionada por varios autores, ya que frecuentemente la variación temporal observada es superior a la espacial (Whelan y McBratney,).

2.3.1 Información proveniente de imágenes

La información obtenida por satélites o aviones que caractericen las condiciones del suelo, o el crecimiento y desarrollo de un cultivo pueden ser muy útiles en el manejo sitio-específico, siendo además de un relativo bajo costo (Mooran et al., Senay et al. citados por Plant, 2001).

Esta información se debe procesar e incorporar a la información previa, y analizar una posible relación ente las variables medidas y las condiciones de manejo (Bragachini, 2007). estas herramientas se deben correlacionar con propiedades del cultivo y del suelo que afectan el rendimiento (Bragachini, 2007).

2.3.2 Análisis de Clusters y CART

Existen varios métodos estadísticos que ayudan a estudiar la variabilidad de datos de una variable: los análisis de clusters y el CART. El objetivo del análisis de clusters es generar agrupación de datos que minimicen la varianza dentro ellos y la maximicen entre ellos. (Roel, 2006a). Por otro lado, la herramienta Classification And. Regression Trees (CART) es un método no paramétrico, que no necesita que sus datos presenten una distribución normal (Roel, 2006a). En la conformación del árbol de regresión y clasificación se trabaja con múltiples estructuras de datos en distinto tiempo y espacio, que permiten identificar las distintas variables que están afectando y a qué nivel (Plant, 2004 citado por Roel, 2006a).

Este tipo de análisis tiene varias ventajas sobre el uso de métodos de regresión lineal clásica: 1) no hay necesidad de especificar en forma funcional y verificar que se ajuste a los datos a los supuestos de un modelo lineal (ejemplo distribución normal, varianzas homogéneas, observaciones independientes); 2) selecciona las variables en forma automática; 3) minimiza el efecto de los valores extremos, aislándolos en pequeños nodos, y 4) aísla el efecto de las variables a las partes del árbol, para descubrir la dependencia del contexto y las interacciones entre las variables (Plant, citado por Otaño y Zarucki, 2010).

Plant (2001) encontró que la metodología de análisis de CART es una valiosa y objetiva información para la conformación de zonas de manejo y útil en describir la relación entre variables de respuesta y variables explicativas como pueden ser las propiedades del suelo.

2.3.3 Análisis geoestadístico

El análisis de datos con un componente espacial se denomina geoestadística (Plant, 2001).

El análisis geoestadístico contempla dos etapas: la primera en el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por interpolación Bosques Sendra, En la mayoría de las variables, observaciones cercanas en el espacio son más semejantes entre sí que con aquellas más distantes, por lo que la distribución espacial de dichos atributos no es independiente (Plant 2001, Best y León 2006).

Best y León (2006) establecieron que esa interpolación de datos a espacios que no contienen información se basa en el principio de autocorrelación o asociación espacial.

Si la variable bajo estudio muestra un patrón aleatorio, no existe autocorrelación espacial y no es posible representarlo en un mapa (Best y León, 2006).

En los métodos de medición continuos, medidas de la variable son obtenidas en todo el campo y se obtienen mediante técnicas de sensoramiento remoto como las imágenes satelitales, y monitores de rendimiento. En los métodos de muestreo discretos, se relevan algunos sitios predeterminados y sólo algunos puntos de la chacra son observados (Mulla y McBratney, citados por Pravia, 2009).

Una de las herramientas ampliamente utilizadas para la descripción espacial de los conjuntos de datos corresponde al semivariograma y es de gran importancia para la determinación de una de las mejores técnicas de interpolación utilizadas, el método de kriging (Best y León, 2006).

El semivariogramal es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (h). En un semivariograma teórico se distinguen los parámetros “ C_0 ” el efecto pepita, “rango” la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza y a partir de donde ya no existe correlación entre pares de puntos, y “ $C + C_0$ ” los valores de semivarianza alcanzados en el rango (Best y León, 2006).

2.3.4 Planimetría y altimetría

La planimetría es un elemento central en el proceso de zonificación, ya que permite ubicar el sitio en estudio, tener georeferenciados los desperdicios, y por lo tanto, conocer el área útil del sitio a manejar.

Por otro lado la altimetría es clave en la determinación de ambientes y/o zonas de diferente potencial, asociada a la dinámica del agua y los nutrientes.

Kravchenko y Bullock (2000) encontraron para chacras en Iowa que las características topográficas explicaron un 20% de la variación del rendimiento (6 a 54%) en donde los rendimientos altos fueron consistentemente ubicados en las zonas bajas (correlación negativa entre rendimiento y elevación). Cuando se analizó conjuntamente con las propiedades del suelo, éstas explicaron el 40% de la variación (10 a 78%).

La relación entre el régimen pluviométrico con la topografía y el rendimiento son contradictorias explicadas principalmente por las diferencias del suelo y condiciones climáticas que se generaron (Kravchenko y Bullock, 2000).

Los atributos topográficos cobraron importancia en los años secos mientras que años con precipitaciones moderadas perdían importancia relativa (Kaspar et al., 2010a, Simmons et al.).

Kaspar et al. citado por Martín et al.(2004) encontraron que en años secos el rendimiento estuvo correlacionado positivamente con variables relacionadas a la disponibilidad de agua, posición topográfica, suelos de textura fina y alto contenido de carbono orgánico, siendo la posición topográfica el factor más importante.

2.3.5 UAV como herramienta en la delimitación de ambientes

Un vehículo aéreo no tripulado, Unmanned Aerial Vehicle: UAV, es una aeronave capaz de volar sin piloto a bordo. Estas aeronaves integran sistemas de posicionamiento como GPS, GPS+EGNOS o futuro Galileo, navegación mediante GIS, servomecanismos y una CPU, encargada de pilotar el avión sin necesidad de tripulación. (Gallardo Valdivia et al., 2007).

Un Sistema de Información Geográfica, SIG (denominado en inglés GIS, Geographic Information System) es el conjunto de software de ordenador, hardware y periféricos que transforman datos espaciales referenciados geográficamente en información sobre localizaciones, interacciones espaciales y relaciones geográficas de las entidades fijas y dinámicas que ocupan un espacio en entornos naturales o construidos. (Gallardo Valdivia et al., 2007).

La misión del vuelo fotogramétrico tiene por objeto, el sobrevolar la zona a altura y velocidad constante, describiendo una serie de trayectorias, paralelas entre sí, mediante su control de deriva. Dentro de una trayectoria, la cámara irá tomando fotografías de terreno con cadencia tal, que la distancia entre dos puntos principales consecutivos, asegure un recubrimiento longitudinal prefijado entre fotografías adyacentes. Entre dos trayectorias consecutivas, generalmente voladas en sentido inverso, existe otro recubrimiento transversal, previamente fijado. (*Gallardo Valdivia et al., 2007*).

Una vez realizado el vuelo se procede a la realización de la georeferenciación de las imágenes. La georeferenciación de imágenes o también denominado “geotagging”, consiste en añadir en el fichero de una imagen, información sobre la posición en el momento de la espontánea y datos sobre las características técnicas y el contenido de la misma (*Gallardo Valdivia et al., 2007*).

Las aplicaciones en el uso de UAV han sido principalmente en cultivos de viña, como por ejemplo: 1) extraer automáticamente los límites de parcelas de montes de viña mediante imágenes georeferenciadas; 2) controlar el riego; 3) realizar gráficos de evolución, estacional o anualmente de la vegetación; 4) detectar cambios entre imágenes con diferentes fechas; 5) calcular índices de vegetación para discriminar la vegetación activa; etc.

Actualmente existen tres países en el mundo, Australia, EUA y Reino Unido, que integran el concepto UAV en las regulaciones descritas por las autoridades encargadas de aviación civil.

2.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS

2.4.1 Definición de ambientes por propiedades químicas de los suelos

Las propiedades químicas de los suelos presentan variabilidad espacial, no siendo la misma para todas las variables. Los parámetros como pH, carbono orgánico y textura presentan baja variabilidad espacial, mientras que la conductividad eléctrica y el fósforo (P) son de alta variación, según lo mencionado por (Mulla y MacBratney y citado por Terra et al., 2010a).2010a). El carbono orgánico o la materia orgánica es un indicador de la “bondad del suelo” o calidad del mismo. Por lo general suelos con mayor nivel de materia orgánica son más productivos como también más ricos en los niveles de nutrientes esenciales para el normal desarrollo de los cultivos. Kravchenko y Bullock (2000) encontraron niveles mayores de materia orgánica en zonas topográficas más bajas. Ésta fue la propiedad del suelo que presentó mayor

correlación con el rendimiento de soja siendo alta y positiva para valores de análisis de materia orgánica inferiores a 3%.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la cuantificación de la capacidad del suelo de retener cationes y se expresa como cmolc kg^{-1} . Las posiciones de intercambio están ocupadas por cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+} y Fe^{3+} (Durán et al., 1997). El valor absoluto de las bases que presentan los suelos es una información relevante para la interpretación de las propiedades químicas de los suelos, y también el valor relativo a la CIC. Según Durán et al. (1997) para los suelos del Uruguay son de 70-80% para Ca, 10-20% para Mg, y 10% para K+Na, expresados como % de bases totales.

Un amplio rango de relaciones Ca/Mg son capaces de satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo de soja. Según Quaggio et al. (1982) la relación Ca/ Mg óptima para el rendimiento de soja es 25.

Asimismo, si el suelo presenta cantidades absolutas de Ca, Mg y K adecuadas, la relación entre ellos no influye en el rendimiento del cultivo ya que la disponibilidad total de los mismos es más importante (Liebhardt, citado por Kopittke y Menzies, 2007).

2.5 SUELOS SÓDICOS

2.5.1 Definición de suelos sódicos

Según *Taboada y Lavado*, (2009), se refiere a un suelo salino sódico al que puede contener suficiente cantidad de sodio intercambiable y apreciables cantidades de sales solubles para interferir con el crecimiento de la mayor parte de los cultivos. El PSI es mayor a 15, la conductividad del extracto de saturación es mayor que 4 dSm^{-1} y el pH del suelo saturado es usualmente 8.5 o menor.

2.5.2 Influencia de la sodicidad en los cultivos

La influencia del sodio sobre las propiedades del suelo y, en última instancia, sobre las plantas, está determinada por los fenómenos de hinchamiento y dispersión de las arcillas. Las arcillas sódicas se hinchan y desarrollan grandes presiones dentro de los agregados. El movimiento de estas arcillas y el consecuente bloqueo de los poros, son las principales causas de la reducción de la permeabilidad (*Taboada y Lavado*, 2009).

Aún en suelos con bajas concentraciones de sales, se pueden presentar problemas de Na en suelos con bajo PSI, según el tipo de suelo y los valores de CE (Summer, 1993; Torres Duggan et al., 2012).

Otra característica distintiva de los suelos sódicos es la baja movilidad del agua. Por un lado, ello se debe a que gran parte del agua está fuertemente retenida en las arcillas y permanece prácticamente inmóvil. Por otro lado, el sistema de poros se encuentra colapsado por la inestabilidad de los agregados (*Taboada y Lavado, 2009*).

Como resultado de la oclusión del sistema de poros, se produce la disminución en la tasa de infiltrado (entrada de agua al suelo). Existe una reducción directa e inversa entre la tasa de infiltración y el porcentaje de sodio intercambiable de un suelo. Del mismo modo sucede con la conductividad hidráulica saturada, que es el parámetro que caracteriza la permeabilidad o velocidad con que se mueve el agua a través del suelo. Por lo tanto, la capacidad total de almacenamiento hídrico en los suelos sódicos se reduce, debido a la entrada restringida de agua. La capacidad de almacenamiento de agua es muy baja y solo por corto plazo puede satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos. (*Taboada y Lavado, 2009*).

Por otro lado el Na presente en el suelo puede tener un efecto directo sobre la planta, ya que un aumento en su concentración interfiere en el metabolismo celular, interfiriendo en el transporte de otros iones y causando pérdidas excesivas de agua. Estos daños ocurren primero en las hojas más viejas (*Taboada y Lavado, 2009*). En soja el Na puede ser problemático cuando toma valores por encima del 15% de la CIC, ya que puede provocar deficiencia de micronutrientes debido al aumento del pH. Puede también sustituir al K en ciertas funciones en las plantas, especialmente relacionadas a mantenimiento de la turgencia, y afectar por efecto osmótico la absorción de agua (*García et al., 2009*). Cabe mencionar que el valor crítico de PSI 15% es un límite taxonómico de suelos sódicos. Sin embargo, existen diferentes límites críticos de PSI para cada tipo de suelo, asociados a propiedades como mineralogía de arcillas (2:1; 1:1); porcentaje de arcilla, etc. En regiones húmedas, se han reportado valores críticos más bajos. Un ejemplo local es que AAPRESID, en sus criterios para realizar certificaciones del proceso de siembra directa, considera como límite crítico 5% de PSI sobre el cual comienza una progresiva sodificación del suelo y esa referencia se ubica “en los promedios” reportados en la literatura Australiana donde existe mayor investigación es esta problemática.

Según Grattan y Grieve (1992), las plantas son selectivas de altas relaciones K/Na. La selectividad de K por sobre Na varía entre especies y cultivares. En soja, a mayor salinidad menor absorción de K y menor presencia en tejidos de diversas plantas lo cual afecta el rendimiento. Álvarez

et al. (2009) encontraron que el rendimiento de soja se correlacionó negativamente con los niveles de Na⁺ intercambiable y valores de 0,61 meq/100g se correspondieron con sectores de muy baja producción de soja.

2.5.3 Manejo de suelos sódicos

Existen diferentes técnicas de manejo deben aplicarse según los objetivos específicos, propios de cada caso. Los principios básicos que guían a la mayoría de ellas son: La reducción del ascenso capilar desde la capa freática; el incremento de la infiltración; la recuperación de la cobertura; la mejora de la condición física y química de los suelos. (Taboada y Lavado, 2009).

El yeso es la enmienda más difundida para rehabilitar suelos sódicos, debido a su disponibilidad y bajo costo. El yeso aporta calcio y electrolitos para recuperar suelos sódicos o para evitar la sodificación de suelos salinos. Se considera que la respuesta inicial al yeso resulta de la concentración electrolítica, que flocula al suelo ya dispersado o evita que se disperse si aun no lo está. En la medida que mejora la penetración del agua en el suelo, va cobrando importancia el intercambio de Na⁺ por el Ca²⁺. (Taboada y Lavado, 2009).

La eficiencia del enyesado en general es baja, en el orden del 20 al 30%. La baja eficiencia de la enmienda incrementa los costos, por lo que en los últimos años se ha tendido a utilizar dosis anuales pequeñas, por ejemplo 5 Mg ha⁻¹, a lo largo de cierto tiempo, en lugar de dosis altas una sola vez. El principal efecto del yeso es mejorar la capacidad del suelo de infiltrar agua de lluvia (Taboada y Lavado, 2009).

Las ventajas del yeso para prevenir y corregir la sodicidad se deben al mejoramiento de las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas del suelo y se traducen en una mayor:

- estabilidad de materia orgánica del suelo.
- mayor estabilidad de los agregados del suelo.
- mejoramiento de la infiltración del agua y más rápida germinación de las semillas.
- La percolación es una de las variables que más reflejan la recuperación de la condición física del suelo luego de la aplicación del yeso. Las dosis más frecuentemente encontradas como suficientes para lograr cambios significativos en la condición física del suelo son del orden de 1.000 a 3.000 kg/ha de yeso.

Costa y Godz (1999) encontraron que el agregado e incorporación de yeso en los primeros 10cm del suelo, bajo condiciones de secano, redujo los valores de Na y pH superficiales. Para alcanzar a reducir el Na hasta los 45cm de profundidad fue necesario aplicar 60 toneladas de yeso por hectárea. Después de 10 años se comenzó a revertir el efecto del enyesado.

Lazovich et. al. (1985) encontraron disminución en nivel Na y de Mg por el uso de yeso como enmienda en un ensayo de invernáculo.

Muchos trabajos muestran la reducción de Mg en los primeros cm del perfil del suelo cuando se aplica yeso (Loveday, 1976; Pavan et al., 1984; Alvaa y Gaschob, 1991; Syd-Omara y Sumnera, 1991).

En Uruguay no existen estudios publicados de aplicación de yeso, excepto un trabajo de García (2002), en el cual se estudió el efecto de la aplicación de yeso como portador de S para cultivos de trigo, en dosis de 0, 25 y 50 kg/ha de S aplicados como yeso.

Cabe hacer mención que el manejo de suelos sódicos es muy complejo, y que para su rehabilitación y/o mejora se dispone de diversas opciones agronómicas como la utilización de especies adaptadas, utilización de drenes topo, forestación, prácticas de sistematización, etc. Es decir, la corrección química a través de la aplicación de yeso agrícola es una opción, pero no la única y que la efectividad del mismo y su perdurabilidad es variable, principalmente asociado al riesgo de ascenso capilar y/o el riesgo de nuevos aportes de sodio en suelos hidro-halomórficos con napa cercana (Cisneros et al. 2008).

2.6 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIAL NORMALIZADO (IVND) COMO HERRAMIENTA

2.6.1 Definición de (IVND) y su capacidad para definir zonas de manejo

Se parte de la base que el suelo y el cultivo reflejan la radiación solar de manera distinta (Perry y Lautenshlager, citados por Seidl et al., 2000). En distintos experimentos se han alcanzado buenas aproximaciones del estado sanitario del cultivo e incluso estimación del rendimiento a partir del índice de verde normalizado.

La mayoría de las imágenes obtenidas por percepción remota de índice de verde que están sin calibrar pierden validez en explicar diferencias en el

crecimiento del cultivo en biomasa o IAF y poder diferenciar zonas distintas dentro de la chacra (Seidl et al., 2000).

La calibración es fundamental para poder utilizar los datos de índice de verde como input en modelos de crecimiento de cultivos. La calibración se realiza a través de un algoritmo de optimización entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado para disminuir la suma cuadrados del error (Goffe et al., citado por Seidl et al., 2000).

Para el cálculo de índice de verde normalizado con valores entre 0 y 1 se aplica la siguiente fórmula:

$$NVI = \frac{VI - \text{MinVI}}{\text{MaxVI} - \text{MinVI}}$$

NVI -índice de verde normalizado

VI – índice de verde promedio para cada celda

Min VI - mínimo promedio de índice de verde para cada celda en toda la chacra

Max VI – máximo promedio de índice de verde para cada celda en toda la chacra.

2.6.2 IVND como estimador de rendimiento

Ma et al. (2001) plantean que el IVND tiene un uso potencial rápido, confiable y repetible. Es un indicador para proyectar y estimar rendimiento en grano. Para el caso de soja encontró una alta y positiva correlación entre ellos con mejoras progresivas de R4 a R5, respecto de R2. Martín et al. (2004) encontró que el IVND presenta limitaciones en su habilidad para determinar el status nutricional y energético de la planta en estados avanzados en donde el canopeo ya está completamente desarrollado.

Existen diversos estudios empíricos que afirman que INVD es un buen estimador de biomasa y rendimiento de ciertos cultivos agrícolas. Distintos autores encontraron una alta correlación entre el IVND y el rendimiento de trigo (Yuzhu, Benedetti and Rossini, citados por Plant, 2001) aunque varió mucho cuando se analizaron distintos cultivares (Ball y Frazier, citados por Plant, 2001).

Algunos estudios no han encontrado ninguna relación entre el IVND y rendimiento (Plant, 2001). Las causas son varias y entre ella se menciona que el IVND se relaciona con IAF, color de las hojas y biomasa por encima del

suelo. También se plantea que este indicador debería tomar en cuenta la estructura genética del canopeo (Ma et al., 2001).

Según Seidl et al. (2000) la relación entre índice de verde y rendimiento sigue una tendencia lineal para soja antes de comenzar el proceso de senescencia y se pueden observar correlaciones entre 0,5 y 0,6 entre rendimiento e índice de verde.

Existen resultados contrastantes respecto de este indicador para estimar rendimiento en grano de soja. El IVND no es del todo eficiente para aquellos cultivos en donde el material vegetal no es el componente económico y éste último depende de distintos factores como índice de cosecha y calidad (Plant, 2001).

Martín et al. (2004) encontró una alta correlación entre rendimiento e IVND en zonas bajas de la chacra con pendientes suaves, con alto carbono orgánico y elevada conductividad eléctrica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO

3.1.1 Descripción del sitio de muestreo

El estudio se realizó en el verano 2011-2012 en el establecimiento “El Bravío” del propietario Marcos Guigou, ubicado en la ruta 96 Km 30 al Sur de la ciudad de Dolores en el departamento de Soriano, Uruguay. El área útil del campo es 502.88has de una superficie total de 550,40 ha. El grupo de suelos CONEAT (Escala: 1 -20000) dominante del campo es 03.51 y 03.52 y en menor medida 10.15; 11.2; 11.7 y 03.3.

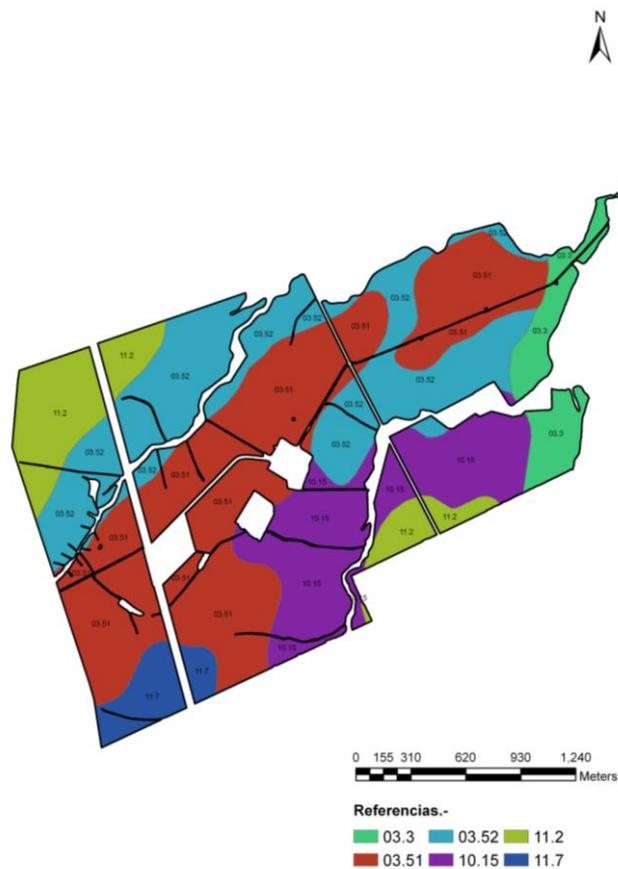


Figura 1 Ubicación del Establecimiento “El Bravío” superpuesto sobre mapa CONEAT Escala: 1- 20000 (Fuente: CONEAT, 1967).

3.1.2 Descripción de los principales suelos

Según el índice CONEAT en el área de estudio existen los siguientes tipos de suelos:

03.51: Este grupo se localiza mayormente en el Dpto.de Soriano, observándose al oeste de la ciudad de Dolores; también existe en algunas áreas en los Dptos, de Colonia, San Jose y Canelones. Son planicies altas, a veces laderas muy suaves, con pendientes menores de 1 %, excepcionalmente inundables. El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos de color pardo. Los suelos dominantes son Brunosoles Eutricos Luvicos (Praderas Pardas maximas y planosolicas), de color pardo o oscuro, textura franco limosa, fertilidad alta y drenaje imperfecto. En este grupo normalmente no existen Solonetz, pero en algunas areas pueden aparecer en un porcentaje menor al 5 %. Son areas cultivadas en algunos lugares y en otros constituyen tierras pastoriles con pasturas invierno-estivales de alta calidad. Este grupo integra, por razones de escala, las unidades Villa Soriano y Kiyu de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.).

03.52: Este grupo corresponde a dos situaciones: a) -las planicies altas alcalinas localizadas en el litoral oeste, asociadas a las planicies bajas del Rio Uruguay, con extensiones significativas en los alrededores de San Javier (Dpto de Rio Negro), pero que existen tambien en los Dptos. de Paysandu y Soriano y algunas areas en el Dpto. de Salto. Son excepcionalmente inundables y presentan vegetacion de parque con densidad variable de arboles, espinillos, algarrobos,etc. Este grupo integra, en esta region, las unidades Villa Soriano y Banados de Farrapos en la carta escala 1:1.000.000 (D.S.F.) b) - Otra situacion corresponde a las planicies inundables de arroyos, como la existente en el A. Canelon Chico, con ocurrencia en los Dptos. de Canelones, San Jose y Colonia. Estas planicies presentan vegetacion de parque y selva fluvial asociada a los cursos de agua. Por razones de escala, esta areas no aparecen en la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.). En ambas situaciones los suelos dominantes son Brunosoles Eutricos Luvicos (Praderas Pardas maximas), de color pardo oscuro, textura franco limosa, fertilidad alta y drenaje imperfecto y Solonetz Ocricos, de color pardo grisaceo claro, textura franco limosa, fertilidad muy baja y drenaje imperfecto. Completan la asociacion, suelos afectados por alcalinidad, como Brunosoles Eutricos Luvicos (Praderas Pardas alcalinas), fase sodica y Solods Ocricos. En las planicies de arroyos existen, asociados a los cursos de agua, Fluvisoles Heterotexturales (Suelos Aluviales). En ambos casos el uso es pastoril, limitado por las areas alcalinas (blanqueales).

10.15: Este grupo comprende dos asociaciones de suelos que, desde el punto de vista geomorfológico y geográfico, son distintas, pero que se han reunido por estar integradas por suelos de características similares. Una primera asociación se localiza principalmente en el Dpto. de Soriano, siendo importante en la región al suroeste de Egana. En menores extensiones existe también en el Dpto. de Río Negro y algo en el Dpto. de Paysandú. El material geológico corresponde a sedimentos arenos arcillosos y limo arcillosos, con arena abundante. El relieve es suavemente ondulado, con predominio de pendientes de 2 a 3%. Los suelos predominantes son Brunosoles Subeutricos Típicos y Lúvicos (Praderas Pardas medias y máximas), de color pardo muy oscuro a negro, textura franco arcillo arenosa a franco arenosa, fertilidad media y alta y moderadamente bien a imperfectamente drenados y Vertisoles Rupticos Lúvicos (Grumosoles), de color pardo muy oscuro a negro, textura franco arcillosa, fertilidad alta y moderadamente bien a pobremente drenados. La segunda asociación referida ocurre en las laderas transicionales entre grupos correspondientes a la formación Fray Bentos situados a niveles altimétricos superiores y los grupos cretáceos, localizados a niveles altimétricos inferiores. Su mayor frecuencia se da en el Dpto. de Paysandú y, en menor grado, en los Dptos. de Río Negro y Soriano. El material geológico es un sedimento coluvial con mezcla de litologías de Fray Bentos y Cretáceo. El relieve corresponde a laderas ligeramente convexas, de pendientes de alrededor de 2%. Los suelos dominantes son Brunosoles Subeutricos Típicos y Lúvicos (Praderas Pardas medias y máximas) similares a las ya descritas en la asociación anterior. Las áreas bajo cultivos y rastrojos predominan sobre las zonas pastoriles. La primera asociación citada integra la unidad Cuchilla de Corralito de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.), en tanto que la segunda está incluida mayoritariamente en las unidades Young y Fray Bentos de la misma carta. CONEAT (1967)

3.2 AMBIENTACION DEL CAMPO EL BRAVIO

El establecimiento “El Bravío” se encuentra ambientado desde el año 2008. Los criterios para diferenciar ambientes se basaron en el método propuesto por la empresa ADP S.A descrita por Bosh y Lecueder (2011).

La ambientación del campo se hizo a través de estudios planimétricos y altimétricos, imágenes satelitales, monitores de rendimientos de zafras pasadas y correlación a campo de la información recabada. Además de esto se ajustó la precisión del mapa de ambientes por medio de imágenes aéreas tomadas por un UAV, el cual cuenta con tres cámaras: multiespectral, térmicas y Go-Pro o de alta definición. Esto permitió trabajar con mayor resolución (La

resolución del pixel de la imagen obtenida por el UAV es de 30cm x 30cm; mientras que la resolución del pixel obtenido por la imagen satelital es 30m x 30m.). Con esto se delimitó con mayor exactitud las zonas problemas, ya que no toda el área necesita corrección

Con el mapa de ambientes se definieron tres zonas o ambientes de diferente potencial: un ambiente “A”, que es aquel en el cual todos los años, independientemente de las condiciones climáticas y/o tipo de cultivo sembrado, se logran 30% o más de rendimiento que el promedio del campo; un ambiente “D”, en el cual todos los años los cultivos sembrados siempre rinden menos, siendo un 30% o menor al rendimiento promedio de la chacra. Por último, se identifica el ambiente “B” que es aquel que se comporta como irregular; dependiendo del clima, del cultivo sembrado o de ambos, pudiendo comportarse como “A” o “D” según las condiciones establecidas.

Dentro de cada ambiente se diferencian clases según la ubicación topográfica en la chacra siendo “ml” (media loma), “l” (loma), “b” (bajo). También se diferencian subclases, según los impedimentos físicos y/o químicos; pudiendo ser: “s” (salinidad), “bt” (horizontes B texturales), “ts” (tosca), “a” (anegamiento), “c” (compactación), “p” (pendiente), “e” (erosión), “cv” (Cóncavo), “cx” (convexo). Ej: Ambientes D-l-ts: Ambientes de consistentemente baja productividad, de posición en el terreno loma, con tosca que limita la producción de los cultivos. En la Figura 2 se presentan los ambientes del establecimiento.

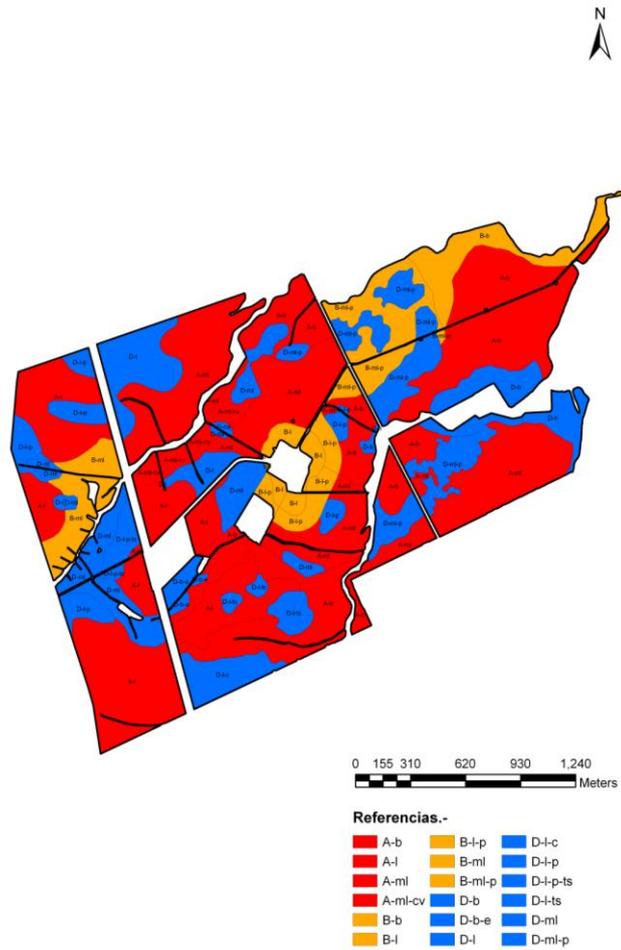


Figura.2 Mapa de ambientes del área de estudio (Fuente: AXA: ADP S.A).

En la Tabla 1 se resumen las áreas de los ambientes del establecimiento “El Bravío”.

Tabla 1: Superficie de los ambientes del establecimiento “El Bravío”

Ambientes†	Superficie (ha)
A-b	105.12
A-l	83.60
A-ml	96.48
A-ml-cv	9.63
B-b	15.35
B-l	7.45
B-l-p	9.51
B-ml	15.15
B-ml-p	19.30
D-b	18.44
D-b-e	3.81
D-l	19.88
D-l-c	9.73
D-l-p	16.64
D-l-p-ts	4.85
D-l-ts	6.37
D-ml	28.79
D-ml-p	32.79
Total Ambientes A	294.83
Total Ambientes B	66.76
Total Ambientes D	141.30

†A, Ambiente que siempre presenta alto valor de Índice Verde Normal Diferenciado (IVDN); B: ambiente que presenta alto o bajo valor de IVDN, según el cultivo y/o año; D: ambiente que siempre presenta bajo IVDN. Segunda letra es posición topográfica: b, bajo; ml: media loma; l: loma. Tercer letra es información adicional: c: zonas cóncavas; cv: zonas convexas; e: zonas con erosión; ts: presencia de tosca; p, pendiente mayor a 3%.

3.2.1 Mapa de Rendimiento

Se utilizaron los mapas de rendimientos disponibles de esa chacra desde el año 2009, con el fin de superponerlos y “detectar” zonas de mayor y menor rendimiento en forma constante con respecto al promedio.

Análisis de imágenes satelitales y monitores de rendimiento

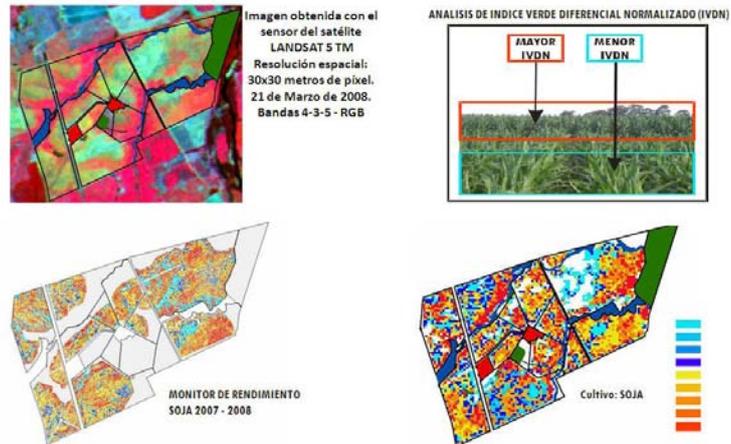


Figura 3: Correlación del monitor de rendimiento con imágenes satelitales y ambientación del Campo “El Bravío” (Fuente: AXA: ADP S.A).

3.2.2 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (IVND)

Según Rouse et. al (1974) la ecuación empleada para obtener el (IVND) es:

$$\text{NDVI - Normalized Difference Vegetation Index} \left[\text{NDVI} = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \right]$$

Los datos de IVND provienen de imágenes satelitales obtenidas desde el año 2000, durante los períodos críticos de cada cultivo. Los cultivos analizados fueron: trigo en estado fenológico llenado de grano (octubre-noviembre); soja r3-r5 según la escala de Fehr y Caviness (1971) (primer quincena de enero sojas de primera, primer quincena de febrero en soja de segunda); maíz de primera en estado fenológico llenado de grano (fines de diciembre). Además, se realizaron vuelos con cámaras multiespectrales desde el año 2011, para obtener el índice de IVDN,

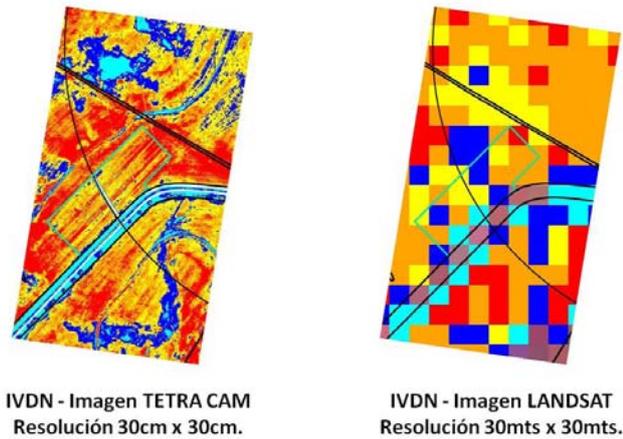


Figura 4: Comparación entre imagen satelital y la obtenida por la cámara TETRACAM montada en un UAV del Campo “El Bravío” (Fuente: AXA: ADP S.A).

3.2.3 Estudios Planimetricos y altimétricos

El estudio altimétrico se realizó con un equipo R3 de la marca comercial TRIMBLE. El trabajo consistió en hacer líneas perpendiculares al alambrado “de ley”, cuyo ancho de labor fue de 60 m. El objetivo de dicho trabajo fue obtener puntos de altitud para luego generar los mapas de altimetría de interés: modelo digital del terreno (MDT), mapa de curvatura, mapa de pendientes y MDT en 3D. Estos mapas se utilizaron para inferir zonas de diferente potencial mediante la superposición de “capas” de interés. En la Figura 5 se presentan los mapas altimétricos.

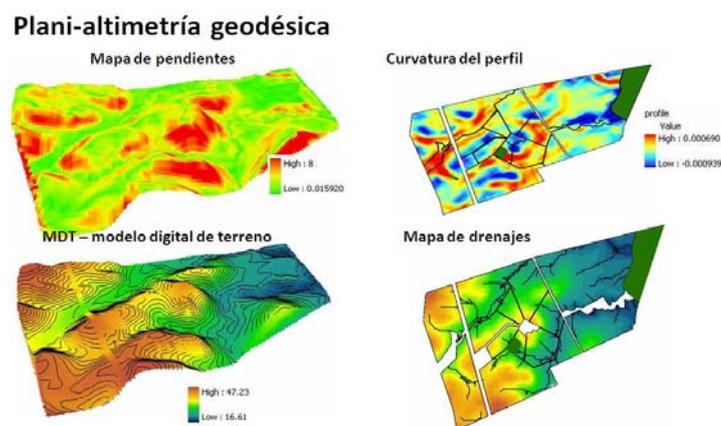


Figura 5: Estudio altimétrico del Campo “El Bravío” (Fuente: AXA: ADP S.A).

3.2.4 Análisis de imágenes multiespectrales y térmicas obtenidas en aviones no tripulados (UAV)

El vuelo se realizó en etapa crítica del cultivo, en el caso de cultivos de verano fue el cultivo de soja, en período comprendido entre R3 y R5 según la escala de Fehr y Caviness (1971). El objetivo de volar en estos períodos es obtener una alta correlación con el rendimiento. Para el cultivo de trigo el vuelo se realizó en el estado fenológico llenado de grano.

El UAV lleva montado tres cámaras: 1) cámara Tetracam, empleada para obtener los índices necesarios para este trabajo (IVDN), contiene 6 filtros con diferentes longitudes de onda (centro de banda de los diferentes filtros: master 722 nm., slave 1 471 nm., slave 2 551nm., slave 3 662nm., slave 4 692 nm., slave 5 831 nm.); 2) cámara Goprho o de alta definición, empleada para georeferenciar las imágenes que comprenden el mosaico, también presenta gran utilidad para distinguir zonas de “no interés” (desperdicios); 3) cámara Flir o termal, si bien esta cámara no tuvo un uso directo, en lo que refiere a la georeferenciación de zonas de interés, la utilidad fue indirecta con el fin de corroborar variabilidad de temperatura en función de variabilidad de biomasa verde. En la Figura 7 y Figura 8 se muestran las cámaras montadas en el avión.

El IVDN obtenido por la cámara teracam, es el resultado de la combinación de Las bandas IR (infrarojo cercano y el R (rojo). La ecuación resultante es $NDVI = (IR \text{ banda } 5 \text{ de } 831 \text{ nm} - R \text{ banda } 3 \text{ de } 662 \text{ nm}) / (IR \text{ banda } 5 \text{ de } 831 \text{ nm} + R \text{ banda } 3 \text{ de } 662 \text{ nm})$



UAVARCANGEL I - Aeronave No Tripulada (Unmanned Aerial Vehicle)

Figura 6: Avión no tripulado; UAV; (Fuente: AXA: ADP S.A).

TETRA CAM Mini MCA 6

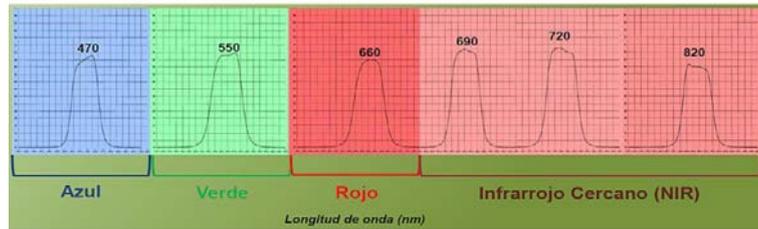
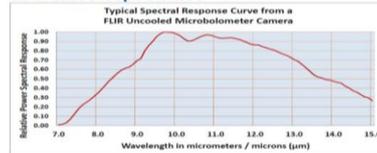


Figura 7: Cámara multispectral TETRA CAM (Fuente: AXA: ADP S.A).

Cámara térmica
FLIR Tau 640



Los datos espectrales



Cámara GORPHO HD
- Cámara óptica



Figura 8: Cámara térmica (FLIR) y GORPHO (Fuente: AXA: ADP S.A).

La Figura 9 ilustra el mapa de ambientes luego de la utilización de imágenes y análisis de IVDN obtenidas por las cámaras montadas en el UAV.

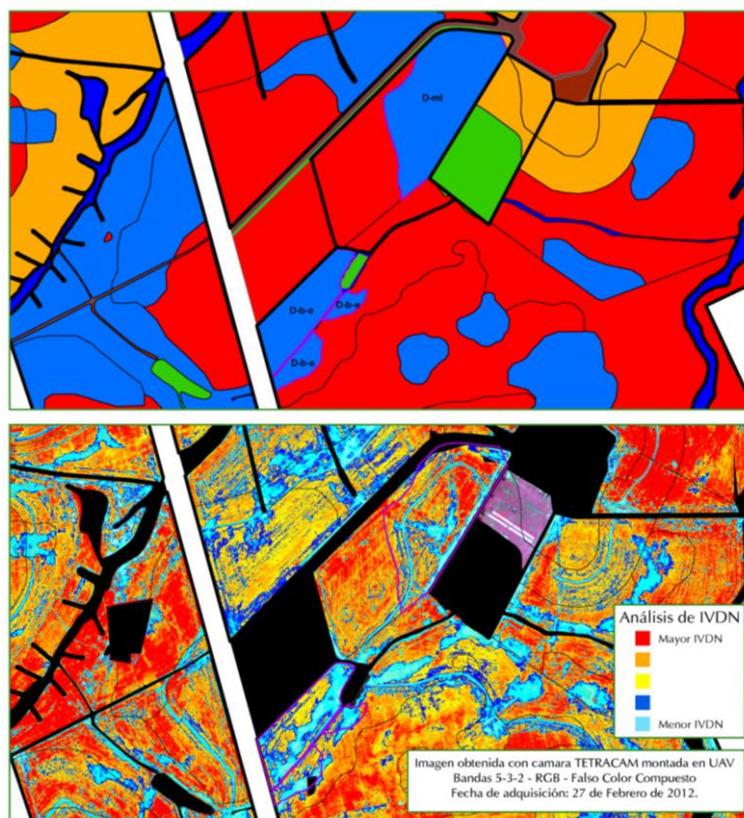


Figura 9: Ajuste de una ambientación por imágenes satelitales con imágenes obtenidas por UAV (Fuente: AXA: ADP S.A).

3.3 DETERMINACIONES

3.3.1 Muestreo de suelos

Durante el verano 2011-2012 se tomaron muestras de suelo del horizonte superficial (0 -20cm) con calador de “balde” de todos los ambientes D del establecimiento “El Bravío”. Cada ambiente D era una muestra compuesta. Si bien no se definió un número de submuestras por ambientes, las mismas fueron tomadas con el criterio del “azar” cada 15 pasos en forma de “zig -zag” dentro de cada ambiente. El objetivo de esto fue determinar las causas químicas que generan el problema de menor rendimiento en estos ambientes.

También se tomaron muestras de dos ambientes A (zonas donde todas las campañas y todos los cultivos en estudio los rendimientos son superiores al promedio del campo).

El total de muestras fue de 26, las cuales se enviaron al laboratorio Lavsa de la ciudad de Dolores. Los análisis que se realizaron fueron: pH por el método potenciométrico, materia orgánica por el método de Walkley-Black,

potasio, sodio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, PSI, acidez intercambiable y titulable y conductividad eléctrica. Este último análisis solo se realizó para tres muestras representativas con el fin de descartar problemas salinos.

En la Tabla 2 se resumen los resultados de las diferentes variables químicas obtenidas por los análisis de suelo de los ambientes de menor potencial (D).

Tabla 2: Análisis químico de ambientes de bajo potencial (Amb. D)

Resultados del análisis de suelo											
Ambientes	pH	MO (%)	K	Na	Ca	Mg	Ac. tit	Al. Int	CIC	P.S.I (%)	C.E dS/cm
		 meq/100g.....								
D-1	6.38	2.5	0.54	1.21	11.74	2.01	2.7	<0,05	18.2	6.64	
A-2	5.57	3.3	0.61	0.14	15.09	1.53	3.8	<0,05	21.17	0.66	
D-l-p-ts Pot 129	6.63	1.7	0.4	1.3	12.87	2.73	1.8	<0,05	19.1	6.80	
D-l-p Pot 128	6.27	2.5	0.54	0.27	9.77	2.08	2.6	<0,05	15.26	1.76	
D-2	6.07	2.1	0.45	0.87	10.74	1.78	4.7	<0,05	18.54	4.69	
D-l Pot 128	6.1	2.4	0.39	0.96	8.01	1.84	2.9	<0,05	14.1	6.80	
D-ml Pot 128	6.1	2.8	0.46	1.03	10.58	2.31	3.4	<0,05	17.78	5.79	
D-ml Pot 129	6.44	2.8	0.41	1.33	10.98	2.16	2.1	<0,05	16.98	7.83	
D-l Pot 132	6.2	3	0.63	1.1	12.89	2.25	2.9	<0,05	19.77	5.56	
A-1	5.76	1.7	0.6	0.17	15.33	1.19	3.3	<0,05	20.59	0.82	0.09
D-l-p Pot 129	6.62	1.9	0.36	0.99	13.36	2.73	1.9	<0,05	19.34	5.11	
D-ml Pot 131	6.29	3.1	0.53	1.03	13.84	2.12	2		19.52	5.27	
D-ml-p Pot 136	6.18	2.6	0.29	0.84	10.4	3.43	2.5		17.46	4.81	
D-ml-p Pot 140	6.9	2.5	0.67	1.71	10.77	3.04	1.1		17.29	9.89	
D-b Pot 139	6.62	1.4	0.94	1.06	7.8	3.18	1.4		14.38	7.37	
D-b-e Pot 130	6.66	2.2	0.61	1.29	12.92	2.51	1.5		18.83	6.85	
D-ml Pot 130	6.65	1.8	0.62	1.26	9.95	2.78	1.3		15.91	7.90	
D-l-p Pot 130	7.1	2.1	0.53	2.38	11.34	3.72	0.9		18.87	12.60	0.2
D-b Pot 140	6.2	2.5	0.41	1.13	8.51	3.14	2.4		15.59	7.24	
D-b-e Pot 131	7.2	1.8	0.44	2.11	11.12	2.67	1.6		17.94	11.76	
D-ml-p Pot 133	6.35	1.7	0.51	1.62	9.03	1.94	2		15.1	10.72	
D-ml Pot 133	5.85	3.2	0.81	0.33	15.92	2.48	2.7		22.24	1.48	0.12
D-l-ts Pot 130	6.4	3.6	0.38	0.17	20.94	1.48	2.1		25.07	0.67	
D-b Pot 130	7.4	5	0.57	0.15	32.5	1.36	0.5		35.08	0.42	
D-ml-p Pot 139	7.1	1.7	0.34	1.77	11.82	3.26	0.9		18.05	9.80	
D-l Pot 133	6.64	3.1	0.52	1.14	16.52	2.33	1.9		22.41	5.08	

Como se observa en la Tabla 2 dentro de los muestreos, también se muestrearon ambientes de alto potencial, para dejar en evidencia que los altos contenidos sódicos se encuentran en ambientes de bajo potencial y no de alto.

Los ambientes de bajo potencial presentan altos valores de Na intercambiable, De acuerdo con Taboada y Lavado, (2009), los ambientes que presentaron mayores valores de sodio intercambiables también presentaron altos valores de pH. La alta conductividad eléctrica de algunos de los suelos muestreados indica que el problema es sódico y no salino (Tabla 2).

Los altos valores de Na intercambiable podrían explicar el menor rendimiento de los cultivos detectados en las imágenes (Figura 4).

3.3.2 Material corrector

El sulfato de calcio o yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) utilizado presentó 85% de pureza química (según datos del fabricante) El objetivo fue llevar los niveles de sodio a niveles donde el sodio no genera problemas tanto directos como indirectos para los cultivos. El nivel de interés de sodio que se buscó fue de 0.4 meq/100g, el cual es el promedio de concentración en sodio que presentan la mayoría de los suelos agrícolas del país.

El material utilizado en este trabajo fue yeso proveniente de la Entre Ríos, Argentina.

Los resultados de los análisis de suelo se utilizaron para armar la prescripción de yeso variable o por ambientes. El criterio fue aplicar yeso en función del nivel de sodio del ambiente. Como los contenidos de sodios entre ambientes fueron diferentes, la cantidad de material corrector (yeso) también lo fue. La dosis aplicada por ambiente dependió del nivel de sodio de los suelos.

Tabla 3: Ejemplo de cálculo de corrección de sodio intercambiable, para obtener valores de Na no problema para el normal desarrollo de los cultivos.

CÁLCULO DOSIS DE YESO PARA CORRECCIÓN SUELOS					
Ejemplo de un cálculo de dosis de yeso, partiendo de los datos de CIC, meq de Na, D aparente y espesor del muestreo.					
Para la muestra 191001 Identif. Amb D. 1 EL BRAVIO					
	datos recibidos			1 meq yeso	
CIC meq/100 g de suelo o cmol/kg suelo	9.7	4) P.M. SO ₄ Ca 2H ₂ O		86	
Na+ meq/100 g de suelo o cmol/kg suelo	1.21			datos recibidos	
Densidad aparente (g/cm ³)	1.25	5) Peso del suelo kg/ha		densidad tn/m ³	1.25
espesor a corregir (m)	0.2		2500000	superficie m ²	10.000
				espesor a corregir mts	0.2
		6) Cantidad de yeso			
Determinación del PSI (%)	7.11		mg/kg		69.66
PSI deseado final PSif (%)	5		g/kg suelo		0.6966
meq de Na+/100g de suelo a reemplazar	0.81		kg/ha		1742
		6.8	tn/ha		1.74
	0	7) Corrección de la dosis			
	0	yesoer 85% de SO ₄ Ca 2H ₂ O			2.00
		eficiencia de desplazamiento 80%			2.30 TN/HA

Dosis = Na * M. S. x meq de yeso x P.M. x E.D.

Donde:

Dosis: dosis de yeso en kg/ha

Na: Na intercambiable a reemplazar en meq/kg (e.g.: 0.81 *10)

M.S.: masa de suelo (kg/ha): D.A * espesor a corregir (m) * 10000(m²)*1000

Meq yeso: masa de yeso que contiene un meq de Ca en kg/meq (86mg/meq/1000000 mg/kg).

P.M.: pureza del material porcentaje de sulfato de calcio (CaSO₄+2H₂O

E.D.: eficiencia de desplazamiento

Para el cálculo de este trabajo se tomo una densidad aparente de 1.25, y espesor a corregir fue de 20cm.

La pureza del material utilizado fue de 85% y se tomó un 80% de eficiencia de desplazamiento.

Tabla 4: Dosis de enmienda (yeso) correspondiente para cada ambiente.

Ambientes	Ca(%)	Mg(%)	Na a reemplazar (meq)	mg/kg	kg/ha	Mg/ha	Yeso 85% Mg/ha	Mg/ha considerando pérdidas por desplazamiento (20%)	Superficie (ha)	Yeso (Mg)
D.1	65	11	0.81	69.66	1742	1.74	2.00	2.30	0.00	0.00
A.2	71	7	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D-l-p-ts Pot 129	67	14	0.90	77.40	1935	1.94	2.23	2.56	2.36	6.04
D-l-p Pot 128	64	14	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D.2	58	10	0.47	40.42	1011	1.01	1.16	1.34	0.00	0.00
D-l Pot 128	57	13	0.56	48.16	1204	1.20	1.38	1.59	0.34	0.54
D-ml Pot 128	60	13	0.63	54.18	1355	1.35	1.56	1.79	1.10	1.97
D-ml Pot 129	65	13	0.93	79.98	2000	2.00	2.30	2.64	8.82	23.32
D-l Pot 132	65	11	0.70	60.20	1505	1.51	1.73	1.99	11.43	22.75
A.1	74	6	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D-l-p Pot 129	69	14	0.59	50.74	1269	1.27	1.46	1.68	0.80	1.34
D-ml Pot 131	71	11	0.63	54.18	1355	1.35	1.56	1.79	6.19	11.09
D-ml-p Pot 136	60	20	0.44	37.84	946	0.95	1.09	1.25	0.00	0.00
D-ml-p Pot 140	62	18	1.31	112.6	2817	2.82	3.24	3.72	7.53	28.05
D-b Pot 139	54	22	0.66	56.76	1419	1.42	1.63	1.88	0.00	0.00
D-b-e Pot 130	69	13	0.89	76.54	1914	1.91	2.20	2.53	3.13	7.92
D-ml Pot 130	63	17	0.86	73.96	1849	1.85	2.13	2.45	0.75	1.83
D-l-p Pot 130	60	20	1.98	170.2	4257	4.26	4.90	5.63	3.09	17.40
D-b Pot 140	55	20	0.73	62.78	1570	1.57	1.80	2.08	3.59	7.45
D-b-e Pot 131	62	15	1.71	147.0	3677	3.68	4.23	4.86	0.00	0.00
D-ml-p Pot 133	60	13	1.22	104.9	2623	2.62	3.02	3.47	0.91	3.16
D-ml Pot 133	72	11	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D-l-ts Pot 130	84	6	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D-b Pot 130	93	4	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D-ml-p Pot 139	65	18	1.37	117.8	2946	2.95	3.39	3.90	0.00	0.00
D-l Pot 133	74	10	0.74	63.64	1591	1.59	1.83	2.10	2.46	5.18

Como se observa en la Tabla 4 cada ambiente tiene una dosis de yeso diferente, la cual es consecuencia de los diferentes niveles de Na intercambiable iniciales. Esta diferencia de agregado de enmienda permite generar el mapa correspondiente (prescripción) (Figura 10).

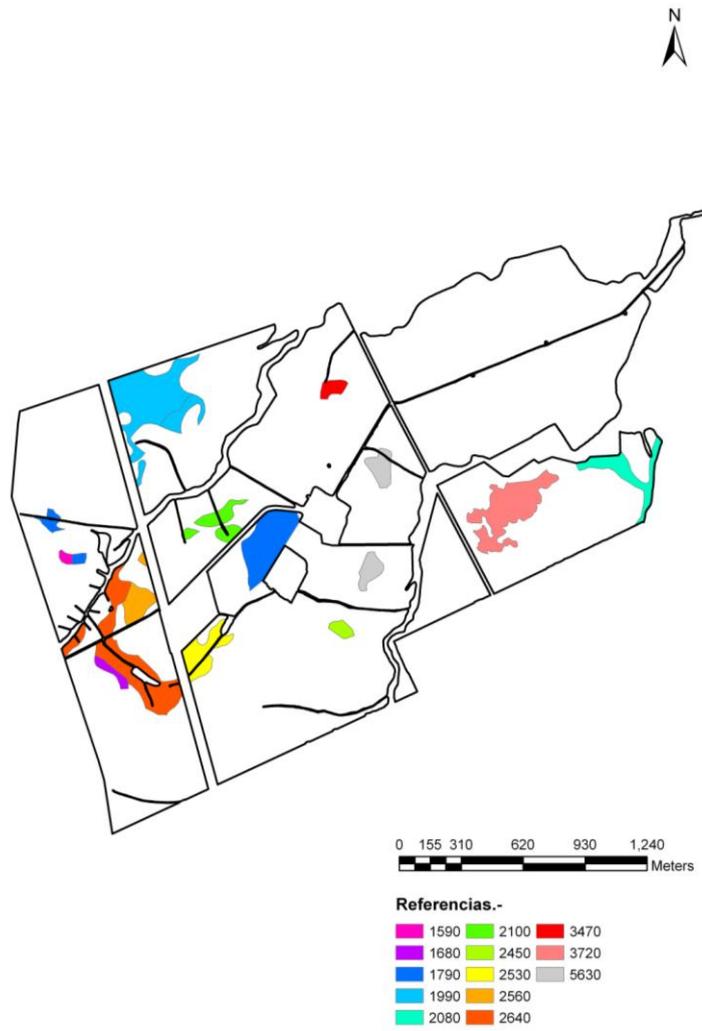


Figura 10: Prescripción de enmienda; yeso variable (Fuente: AXA: ADP S.A).

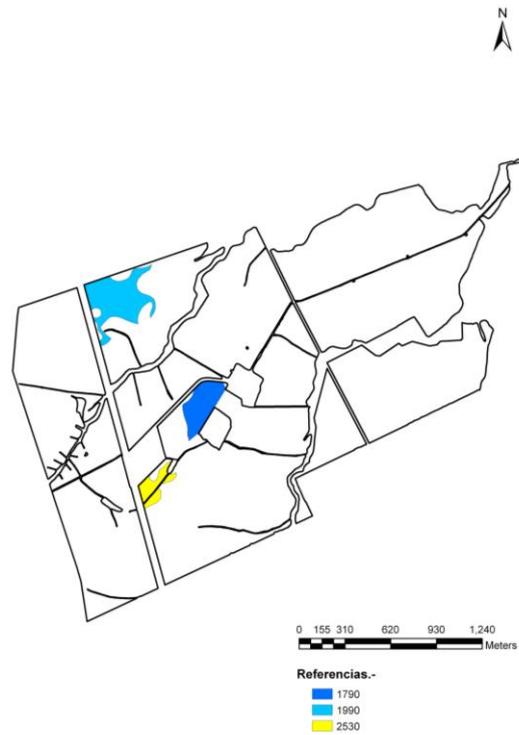


Figura 11: Prescripción de yeso variable en los tres ambientes de interés (Fuente: AXA: ADP S.A).

La aplicación variable de la enmienda se realizó cercano a la siembra de la soja de segunda sembrada en enero de 2012; seis meses después se realizó el muestreo de los mismos ambientes con el objetivo de evaluar el efecto en las propiedades del suelo, posterior a la incorporación del yeso.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Si bien uno de los objetivos del trabajo era corregir la totalidad de los ambientes con altos niveles Na, por motivos logísticos no se pudo realizar la aplicación de la enmienda (yeso) en dichos ambientes. Por lo tanto, en este trabajo solo se presenta el resultado de la corrección de tres ambientes D que contenían antes de la aplicación de los tratamientos los valores más altos de Na intercambiable (Tabla 5).

Tabla 5: Análisis químico de los ambientes de bajo potencial (Ambientes D) luego de la aplicación de la enmienda (yeso).

Variable medida	D-l Pot 132	D-ml Pot 131	D-b-e Pot 130
pH	6.20	6.29	6.66
MO (%)	3.00	3.10	2.20
K (meq/100 g)	0.46	0.54	0.32
Na (meq/100 g)	1.10	1.03	1.29
Ca(meq/100 g)	12.89	13.84	12.92
Mg (meq/100 g)	2.25	2.12	2.51
CIC (meq/100 g)			
P.S.I. (Nax100/CIC)	19.77	19.52	18.83

Tabla 6: Resumen de las variables químicas de los ambientes, previo a la aplicación y seis meses después de aplicada la enmienda (yeso).

	D-l Pot		D-ml Pot		D-b-e Pot		Pr > t
	132		131		130		
	ene	jun	ene	Jun	Ene	Jun	
pH	6.2	6.19	6.29	5.49	6.66	5.91	0.1787
MO (%)	3	3	3.1	4	2.2	2.6	0.2379
K (meq/100 g)	0.46	0.46	0.54	0.54	0.32	0.32	'---
Na (meq/100 g)	1.1	0.21	1.03	0.17	1.29	0.41	0.0001
Ca (meq/100 g)	12.89	15.59	13.84	13.43	12.92	13.35	0.4320
Mg (meq/100 g)	2.25	1.47	2.12	1.65	2.51	1.78	0.0211
CIC (meq/100 g)	19.77	19	19.52	17	18.83	17	0.0786
PSI	5.56	1.1	5.27	1	6.85	2.4	0.0002

Los análisis obtenidos en enero corresponden a la etapa de diagnóstico de ambientes de bajo potencial, mientras que los análisis de junio corresponden al seguimiento de los mismos ambientes, después de haber sido sometidos a un manejo de corrección por el uso de la enmienda.

Según el análisis estadístico, Na, Mg y P.S.I fueron diferentes significativamente ($Pr < 0.05$) y menores a los valores obtenidos previo a la aplicación del yeso. Se observa una tendencia a ser menores los valores de pH y CIC. En el caso de pH puede estar asociado a la acidificación provocada por la enmienda y al descenso significativo del valor de Na. Los valores de K, Ca y M.O. no cambiaron.

Estos datos concuerdan con los encontrados por Costa y Godz (1999) donde el agregado de yeso como enmienda produjo descensos significativos de los valores de Na y pH en los primeros 10 cm de suelo. En relación al Mg, este descenso se podría atribuir a una mejora en las propiedades de infiltración del agua que hubiera provocado un descenso del Mg por lavado, según lo explicado por Lazovich et.al (1985), aunque en este trabajo no fue evaluada. La reducción del Mg en los primeros centímetros del perfil del suelo, producto de la aplicación de yeso, también concuerda con los trabajos de Loveday, (1976); Pavan et al., (1984); Alvaa y Gaschob, (1991); Syd-Omara y Sumnera, (1991).

En la tabla 6 se observa que los valores de P.S.I previo a la incorporación son bajos, como también los de Na intercambiable, tomando como referencia los trabajos de Taboada y Lavado, (2009). Sin embargo los ambientes expuesto en este trabajo son definidos como de bajo potencial, esto concuerda con trabajos de Summer, (1993) y Torres Duggan et al., 2012 donde suelos con bajas concentraciones de sales y P.S.I pueden presentar problemas con Na, dependiendo del tipo de suelo y valores de CE.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La tecnología de agricultura por ambientes y la incorporación de la “capa” UAV permitió delimitar y georeferenciar con gran exactitud los ambientes sódicos, el muestreo por ambientes permito diagnosticar el problema el cual consistía en elevado niveles de Na intercambiable.

Este esquema permitió cumplir con una de las principales hipótesis, debido a que el análisis determino la zonificación del establecimiento el Bravío según el potencial de producción en base a herramientas de agricultura sitio-específica, datos de varias zafras a través de análisis de imágenes satelitales y/o monitores de rendimiento, relevamiento altimétricos y vuelos montados con cámaras multispectrales en aviones no tripulados (UAV).

La aplicación de yeso como enmienda en ambientes de altos valores de sodio permitió bajar significativamente los niveles de P.S.I, Na y Mg medidos a los seis meses desde su aplicación. También se observó una tendencia al descenso de pH y CIC. El uso de yeso no modificó significativamente las variables: K, M.O y Ca.

6. RESUMEN

El creciente aumento de los precios de los granos (específicamente el valor de la soja) ha determinado un marcado interés por zonas o ambientes aun poco explotados o con algunas limitantes. Existe la necesidad de aumentar la productividad en dichos ambientes, por lo que las herramientas de agricultura por ambientes y de precisión cobran importancia tanto en la delimitación de estos ambientes como en la aplicación de insumos en forma diferencial. Uno de los factores que limitan el potencial de los cultivos son los ambientes sódicos. Por lo tanto el objetivo de este trabajo fue reducir los niveles de Na intercambiable en el suelo mediante la aplicación de yeso. Se detectaron los ambientes sódicos mediante el uso de agricultura por ambiente y se aplicó yeso en dosis de aproximadamente 2000 kg/ha. A los seis meses de aplicado el yeso se observó un descenso significativo en los niveles de Na, P.S.I y Mg, mientras que el Ca y K permanecieron invariables. Se observó una tendencia a disminuir el pH y la CIC del suelo. Se requiere más información en este tipo de estudios en Uruguay para corregir suelos con problemas de Na.

7. SUMMARY

The increasing prices of grain (specifically the soybean value) has determined a strong interest in areas or environments even unexploited, with some limitations for crop production. There is need to increase the productivity in these environments, so precision agriculture could become an important tool for both, the definition of these environments and the application of the inputs differentially. One of the factors limiting the crop potential is the sodium environments. Therefore, the aim of this work was to reduce the levels of exchangeable Na in the soil by gypsum application. Sodium environments were detected using precision agriculture, and gypsum was applied in a dose of about 2000 kg / ha. Six months after the application of gypsum, a significant decrease in the levels of Na, Mg, and PSI were observed, while the Ca and K were unchanged. There was a trendline to decrease the pH and the CEC. More information of this type of study is required in Uruguay to correct soils with problems of Na.

8. BIBLIOGRAFÍA

ALVAA, A. K. ; GASCHOB, G. J. 1991. Differential leaching of cations and sulfate in gypsum amended soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. Volume 22, Issue 11-12. pp 1195-1206.

ÁLVAREZ, C.; BARRACO, M.; SCIANCA, C. 2009. Efecto de las condiciones sitio-especifico sobre la productividad y variabilidad de los cultivos en la región de la pampa arenosa. EEA INTA General Villegas, CC 153.

ALVES da SILVA, E. A; URIBE-OPAZO, M. A; GODOY SOUZA, E; VIEIRA ROCHA, J. 2003. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos de solo e planta. Acta Scientiarum. Agronomy. Maringá vol 25 no 2: 365-371.

BEST, S.; LEÓN, L. 2006. Geoestadística. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 147-161.

BONGIOVANNI R; LOWENBERG-DEBOER J. 2004. Precision Agriculture and Sustainability. Precision Agriculture 5:359-387.

BONGIOVANNI, R. 2004. La Agricultura de precisión en la cosecha. Proyecto Agricultura de precisión. INTA Manfredi. pp. 85-90

_____.; J. LOWENBERG-DEBOER. 2006. Adopción de la agricultura de precisión en el cono sur de américa In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 201-219.

BRAGACHINI, M; von MARTINI, A; MÉNDEZ, A. 2000. Alcances y precisión de los monitores de rendimiento. Componentes de agricultura de precisión. Proyecto Agricultura de precisión. INTA Manfredi.

_____.; MÉNDEZ, A.; SCARAMUZZA, F.; PROIETTI, F. 2006. Monitoreo de rendimiento y elaboracion de mapas. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 43-52.

_____. 2007. La agricultura de precisión, presente y futuro. In: Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas (7º., 2007, Manfredi,

Córdoba, Argentina). Actualización técnica sobre los avances en agricultura de precisión. Manfredi, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. pp. 13-28.

BULLOCK, D. G; BULLOCK, D. S; BOLLERO G; RUFFO M. 2003. Agricultura de precisión: Necesitamos algo más que tecnología. University of Illinois, Urbana.

BYRE, K. R; CHEN, P; PURCELL L. C; MOZAFFARI, M; NORMAN, R. J. 2004. First-year soybean growth and production as affected by soil properties following land leveling. *Plant and Soil* 263:323-334.

CISNEROS, J.M.; DEGIOANNI, A.; J. J. CANTERO; A. CANTERO. 2008. Caracterización y manejo de suelos salinos en el área Pampeana. En: La salinización de suelos en la Argentina, su impacto en la producción agropecuaria. E. Taleisnik; K. Grunberg & G. Santa María (eds). Capítulo 2. Editorial Universidad Católica de Córdoba. P 17-46

COSTA, J.L.; GODZ, P. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sureste de la pampa deprimida. *Ciencias del suelo* 17(2): pp 21-27.

DURÁN, A.; IPPOLITTI, G.; ZAMALVIDE, J. P.; GARCÍA, F. 1997. Propiedades físico químicas de los suelos. Código 421. Facultad de Agronomía. pp. 109.

_____.; FIRPO, H. 2006b. Agricultura de precisión en Uruguay. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 236-242.

GARCIA, A. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo. Documento on - line N° 3: http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s_trigo.pdf

GARCÍA, F. O. 2002. Beneficios potenciales del uso de las herramientas de agricultura de precisión en el diagnóstico y aplicación de fertilizantes. Tercer taller de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América. PROCISUR. INTA-INIA.

GRATTAN S. R.; GRIEVE C. M. 1992. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. *Agric. Ecosystems Environ.* 38:275-300.

IRMAK, A; JONES, J. W; BATCHELOR, W. D; PAZ, J. O. 2001. Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in

precision farming. Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers ISSN 0001-2351. Vol 44(5): 1343-1353.

KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*. 92 (1): 75-83.

LAZOVICH, M.; COSTA, J. L.; GODZ, P. 1985. Efectos de enmiendas y lavados sobre el desplazamiento catiónico y producción de materia seca de un Natracuol en invernáculo. *Ciencia del suelo* Vol 3: 95 - 101

LOVEDAY, L . 1976. Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. *Australian Journal of Soil Research* 14(3) pp 361 – 371.

MARTÍN, N. F; BULLOCK, D. G.; BOLLERO, G. 2004. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. *Plant and Soil* 273:39-55.

MANTOVANI, E.; DE CARVALHO PINTO, F. de A.; MARÇAL DE QUEIRO, D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 13-22.

OTAÑO, C.; ZARUCKI, I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos de terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de agronomía. 107p.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. 1984. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a brazilian oxisol. *SSSAJ* Vol. 48 No. 1, p. pp 33-38.

PLANT, R. E. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 30: 9-29.

PRAVIA, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espaciotemporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis M.Sc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.

ROEL, A. 2006a. Análisis de cluster y CART. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 168-170.

Rouse. J. W., R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Planis whit ERTS. Proc: Third ERTS-1 Symposium NASA Goddard, NASA SP-351 pp 309-317.

SAS INSTITUTE. 2008. JMP Users guide; versión 8.0. Cary, NC. 280 p.

SEIDL, M. S; BATCHELOR, W. D; PAZ, J. O. 2000. Integrating remotely sensed images with a soybean model to improve spatial yield simulation. Transactions of the ASAE. Vol 47(6):2081-2090.

TABOADA, M. A.; RAUL, S. 2009. Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. Buenos Aires, Argentina. Facultad de agronomía. 161p

TERRA, J.; MELO, D.; SAWCHIK, J. 2010a. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. In: Reunión Técnica (1ª., 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 7-17.

_____.; TERRA, J. 2006c. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 65-80.

SUMMER, M.E. 1993. Sodic soils - New perspectives. Australian Journal of Soil Research 31(6) 683 – 750.

SYED- OMARA, S. R. SUMMERA, M. E. 1991. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfalfa. Communications in Soil Science and Plant Analysis. Volume 22, Issue pp 19-20.

TORRES DUGGAN, M., ALVAREZ, C.R.; TABOADA, M.A.; CELESTI, T.; VIGNAROLLI, F.; D'AMBROSIO, D. 2012. Impacto del riego complementario sobre las propiedades edáficas en un Argiudol Típico de la Pampa Ondulada. Ciencia del Suelo. 30 (2):201:207.

URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. PRENADER. 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Consultado 17 may. 2010. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat>