

Impacto de la percepción remota y el geoprocusamiento en la agricultura de precisión para sistemas productivos

Impact of remote sensing and geo-processing on precision agriculture for production systems

AUTOR

José A. Melo Demattê

University of São Paulo (USP),
Escola Superior de Agricultura
(ESALQ). Soil Science Department
jamdemat@esalq.usp.br



Palabras CLAVE

Agricultura de precisión,
fertilización, percepción remota,
análisis de suelos

Precision agriculture,
fertilization, remote sensing,
soil analysis

Resumen

En el contexto del manejo de suelos, la Agricultura de Precisión (AP) es la técnica que aplica fertilizante en proporciones variables, de acuerdo con los requisitos del suelo. Esta observación fue verificada por primera vez en 1929. Debido a la necesidad de agricultura a gran escala, los focos principales de la Agricultura de Precisión no pudieron ser implementados en esa época y, por tanto, la aplicación de fertilizantes en grandes áreas se dio haciendo diferentes análisis de suelos. Con esto, la base de la aplicación de fertilizante se dio considerando el promedio de varias muestras de suelos recogidas en un área de usualmente 20 hectáreas. Durante los años 80, el desarrollo del GPS trajo consigo la posibilidad de conocer la posición del tractor en el campo y así aplicar el fertilizante con proporciones variables. La Agricultura de Precisión se inició con una cuadrícula rígida de una muestra por hectárea. Durante la práctica se notó que este muestreo de cuadrícula era muy costoso. Entonces se incluyó otro foco en la Agricultura de Precisión: la relación entre el crecimiento de la planta y la aplicación del fertilizante. Aparte de ir por suelos y/o plantas, la Agricultura de Precisión es un sistema importante para implementarse, ya que le aporta al suelo lo que éste realmente necesita en un mejor ambiente. Por otro lado, el sistema necesita alta tecnología y el conocimiento de expertos. Por tanto, es esencial encontrar un camino más eficiente para el diseño de esquemas de muestreo y/o determinación de suelos. La primera pregunta que surge es: ¿Cómo se pueden establecer criterios para determinar una cuadrícula de muestreo en la Agricultura de Precisión, sin tener un conocimiento de la variabilidad en la clasificación del suelo en un área determinada?



Esto nos llevó a desarrollar sistemas donde el tipo de suelo es parte de la cuadrícula de muestreo. Aparte de ésta tenemos el análisis del suelo. Para esta tarea, el uso de nuevas tecnologías, como la percepción remota se hizo extremadamente interesante. De hecho, la percepción remota y el geoprocésamiento fueron las técnicas más eficientes y menos costosas para la evaluación de suelos, tal como lo observaron varios investigadores. Además, información importante acerca de los suelos puede ser obtenida de sensores orbitales (satélites) y/o sensores de laboratorio (espectro-diámetros), y con esta información podemos mejorar el muestreo de suelos (por identificación de las mejores localizaciones de muestreo) y también el mapeo de los suelos. El uso de datos satelitales se justifica dependiendo de los objetivos del usuario, por ejemplo, al evaluar áreas desde largas distancias. Los modelos de predicción de las características de los suelos han demostrado un gran potencial, ya que la energía reflejada tiene una relación física muy fuerte con varios atributos de los suelos; la información de espectro representa una importante contribución.

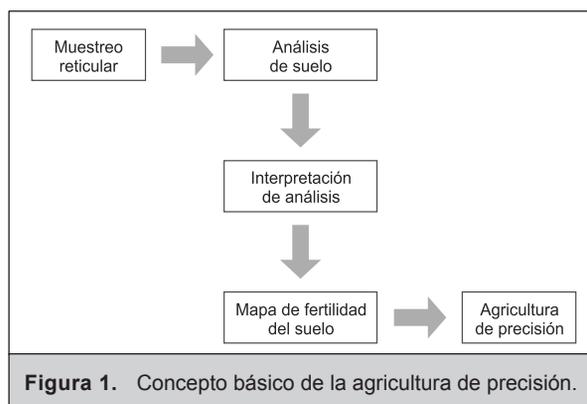
Abstract

In the context of soil management, precision agriculture (PA) is a technique that applies fertilizer at different rates, according to soil requirements. This observation was first verified in 1929. Due to the need for large-scale agriculture, the main approaches of precision agriculture could not be implemented at that time thus the application of fertilizers in large areas was done using soil analysis. Therefore, fertilizers were applied considering the average of several soil samples collected in an area of usually 20 hectares. During the 80's, the advent of GPS brought the possibility of knowing the position of the tractor in the field and that made it possible to apply fertilizers at variable rates. Precision Agriculture began with a rigid grid of one sample per hectare. During the practice it was found that this grid sampling was too expensive so the relationship between plant growth and fertilizer application was included in the Precision Agriculture system. In addition to considering soil and plants, precision agriculture is an important system to implement, as it provides the soil with what it really needs in a better environment. On the other hand, the system needs high technology and expert knowledge. Therefore, it is essential to find a more efficient way to design sampling schemes and / or determination of soils. The first question that comes to mind is: How can we establish criteria for determining a sampling grid in Precision agriculture without knowing the soil classification variability in a given area? This led us to develop systems where soil type is part of the sampling grid. Apart from this, we have the soil analysis. For this task, the use of new technologies such as remote sensing was extremely interesting. In fact, remote sensing and geoprocessing techniques were more efficient and less costly for the evaluation of soils, as observed by several researchers. In addition, important information about soils can be obtained from orbital sensors (satellites) and / or laboratory sensors (spectrum-diameter), and this information can improve soil sampling (by identifying the best sampling locations) and also the mapping of soils. The use of satellite data is warranted depending on the user's goals, for example, to assess areas from long distances. Prediction models for soil properties have shown great potential as the reflected energy has a strong physical relationship with various soil attributes; the information spectrum is an important contribution.





El punto de partida de esta presentación es una pregunta. ¿Qué se puede hacer con la percepción remota en agricultura?, aspecto importante para ver cómo se puede aplicar a la palma de aceite para aumentar la productividad. Al respecto la literatura sobre el tema es escasa (Figura 1).



Al considerar que existe una gran variabilidad en los suelos, se tiene que hacer un muestreo reticular. Las muestras de suelo van al laboratorio donde se hace la interpretación y con eso elabora un mapa de fertilidad de los suelos. Este se integra con los tractores y con el GPS, y esto permite hacer una aplicación variable de las tasas de fertilizante requeridas.

La historia ha enseñado que el concepto básico requiere mucha información y, por ello, ahora se le llama tecnología de la información. Los siguientes son algunos datos de casos en los que la percepción remota ha sido de gran ayuda:

Altos niveles de nitrato observados en el 25% de las áreas fiscalizadas.

Algunos experimentos de campo han detectado una diferencia de 100% en el lixiviado de nitrógeno cuando se comparan los sistemas convencionales con los sistemas de precisión.

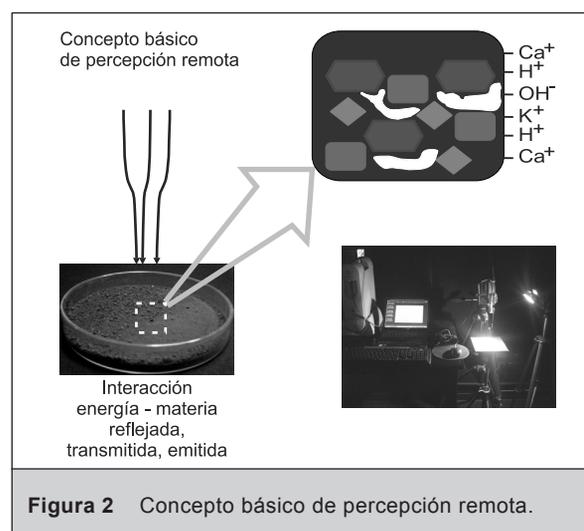
Algunos trabajos han indicado una economía de 13 a 23% en el uso de fertilizantes en maíz y un aumento de 20 a 23% en productividad, utilizando este tipo de agricultura de precisión.

El muestreo reticular que requiere análisis de laboratorio ha variado entre 1 y 4 puntos por hectárea.

Todo esto lleva a la necesidad de hacer la planeación del uso de la tierra para cualquier cultivo y, en particular, para la palma de aceite que va a estar mucho tiempo en el campo. Lo primero es la necesidad de tener mapas edafológicos. Estos tienen una alta correlación entre la información del suelo más el clima, junto con la productividad. También se ha demostrado en caña de azúcar. Existe una relación muy cercana entre el tipo de suelo y no los atributos del suelo, que son dos cosas diferentes.

El hecho es que para obtener esta información hay que realizar una gran cantidad de trabajo de campo, todas las acciones del proceso tienen un alto costo y se requieren de mucho tiempo. En la actualidad se requiere que la información salga más rápidamente y es aquí donde entra el geoprocesamiento, con percepción remota para ayudar a solucionar el problema (Figura 2).

En el concepto básico de la percepción remota es importante tener un objetivo, y puede ser aplicado a cualquier cultivo porque el concepto es el mismo. Este sistema tiene un rango de varias áreas de energía, como por ejemplo, infrarrojo visible, térmico, etc. y ofrece gran cantidad de información. Es el caso de las diapositivas que interactúan con los objetos y se reflejan, y cuando esto sucede regresa cada longitud de onda, que está relacionada con una información específica del objetivo de la planta o del suelo. Este es un ejemplo del sensor en el laboratorio, pero también podemos llevarlo al campo.



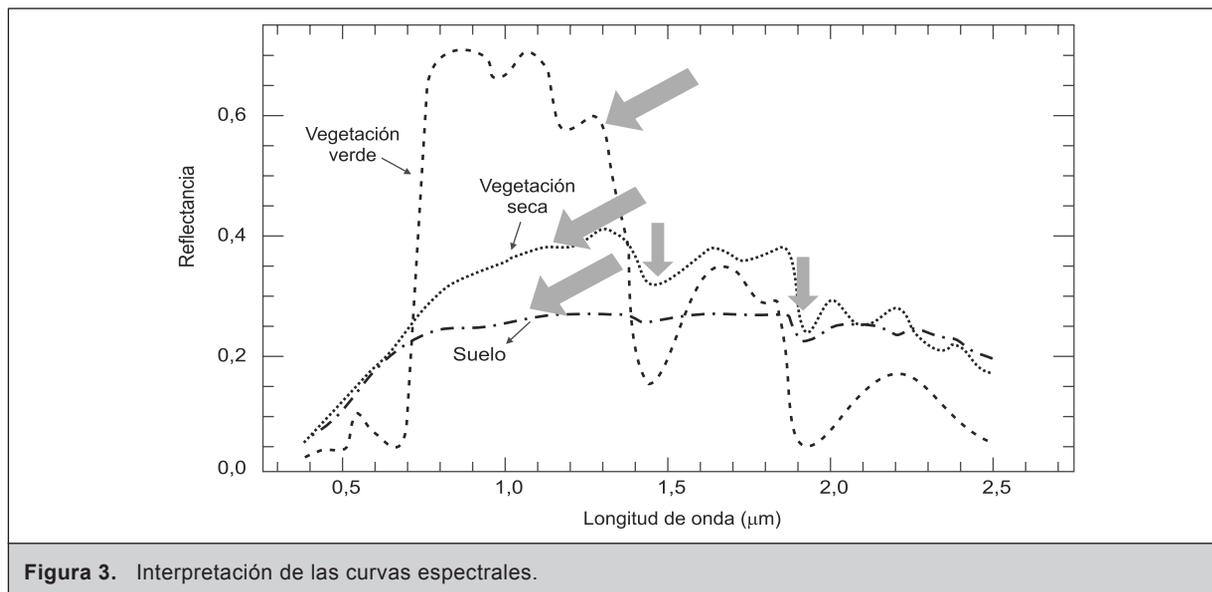


Figura 3. Interpretación de las curvas espectrales.

El anterior concepto lleva a la interpretación de las curvas espectrales. Cada objetivo tiene un tipo de curva espectral diferente, que es el resultado de la interacción de todos los elementos que están allí adentro como los nutrientes, la información física, etcétera. En la Figura 3 se observan dos curvas espectrales, una de vegetación y otra de suelos que son totalmente diferentes.

Estas curvas se interpretan mediante las características de absorción, por la intensidad y el formato, y todo esto se puede integrar a los sistemas cuantitativos, con estadísticas de modelo para poder ver qué hay dentro de los objetos.

Estrategia de aplicación

La primera estrategia se puede lograr con datos de campo y laboratorio, con imágenes satelitales. La estrategia consiste en ir al campo, tomar muestras de suelo, llevarlas al laboratorio y eso arroja las curvas espectrales de las muestras que se interpretan, se colocan en modelos y ofrece ventajas y desventajas. Las ventajas más importantes incluyen información más precisa por el laboratorio, como obtener información de la superficie y de los suelos debajo de la superficie, lo que ayuda a hacer la clasificación de los suelos. La desventaja es que tener que ir al campo y tomar muestras de suelos. En cambio, con este sistema se va al campo con un sensor y se obtiene toda la información.

Hay otro tipo de estrategia para tratar de observar las plantas y los problemas que se presentan: la estrategia satelital. Con la imagen satelital se puede obtener información directamente de la superficie y esta tendrá pixeles que forman las curvas espectrales y así se consigue la misma secuencia, datos modelados, ventajas y desventajas. Las ventajas son obtener información de un área muy grande y de la superficie, es decir, si tiene plantas como la palma de aceite, se puede tener información de esa planta. La desventaja es que si se quiere ver suelo hay que exponerlo.

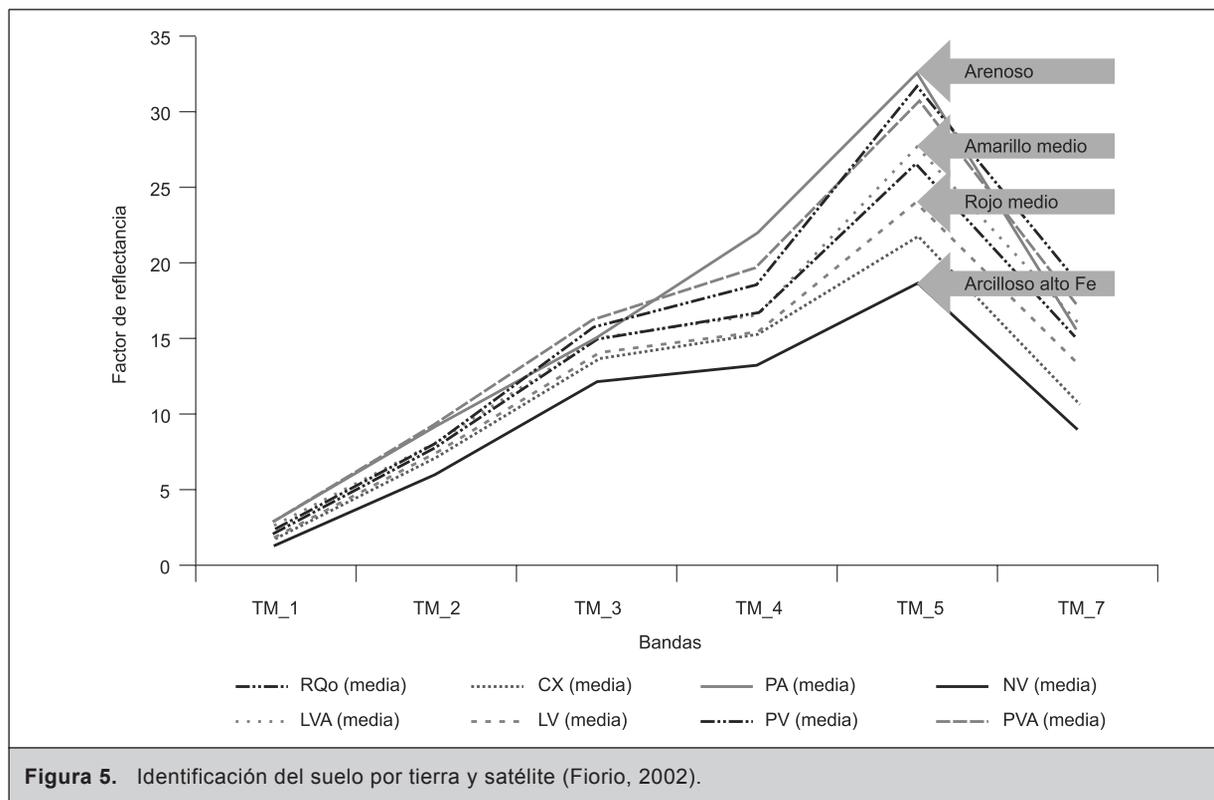
Aplicaciones generales

La primera es la evaluación de los perfiles de los suelos que ayudan con el mapa del suelo, que es la base de la planeación del terreno (Figura 4).

En la Figura 4 se observa que están utilizando un sensor, abren un hueco, insertan una fibra y obtie-



Figura 4. Evaluación in situ de perfiles del suelo. (Ben-Dor *et al.*, 2008).



nen la información debajo de la superficie y con la información tratan de averiguar el tipo de suelo. Si se quiere estudiar un perfil para ver las raíces, se lleva el sensor, se toma la misma información y luego se hará un estudio de los suelos.

En la Figura 5 se observan dos curvas espectrales, una que tiene mucha arcilla y arena y otra que tiene mucha arena. Se puede ir al campo y obtener la misma información, pero desde la imagen satelital se pueden obtener estas curvas espectrales. Son del mismo lugar y aunque se pueden ver diferencias en la precisión, la tendencia es la misma. La figura muestra curvas espectrales de diferentes tipos de suelos. Lo que se ve es un suelo con alto contenido de hierro y muy arcilloso, otro que es de amarillo medio y otros bastante arenosos, entonces esto impacta el mapeo de los suelos.

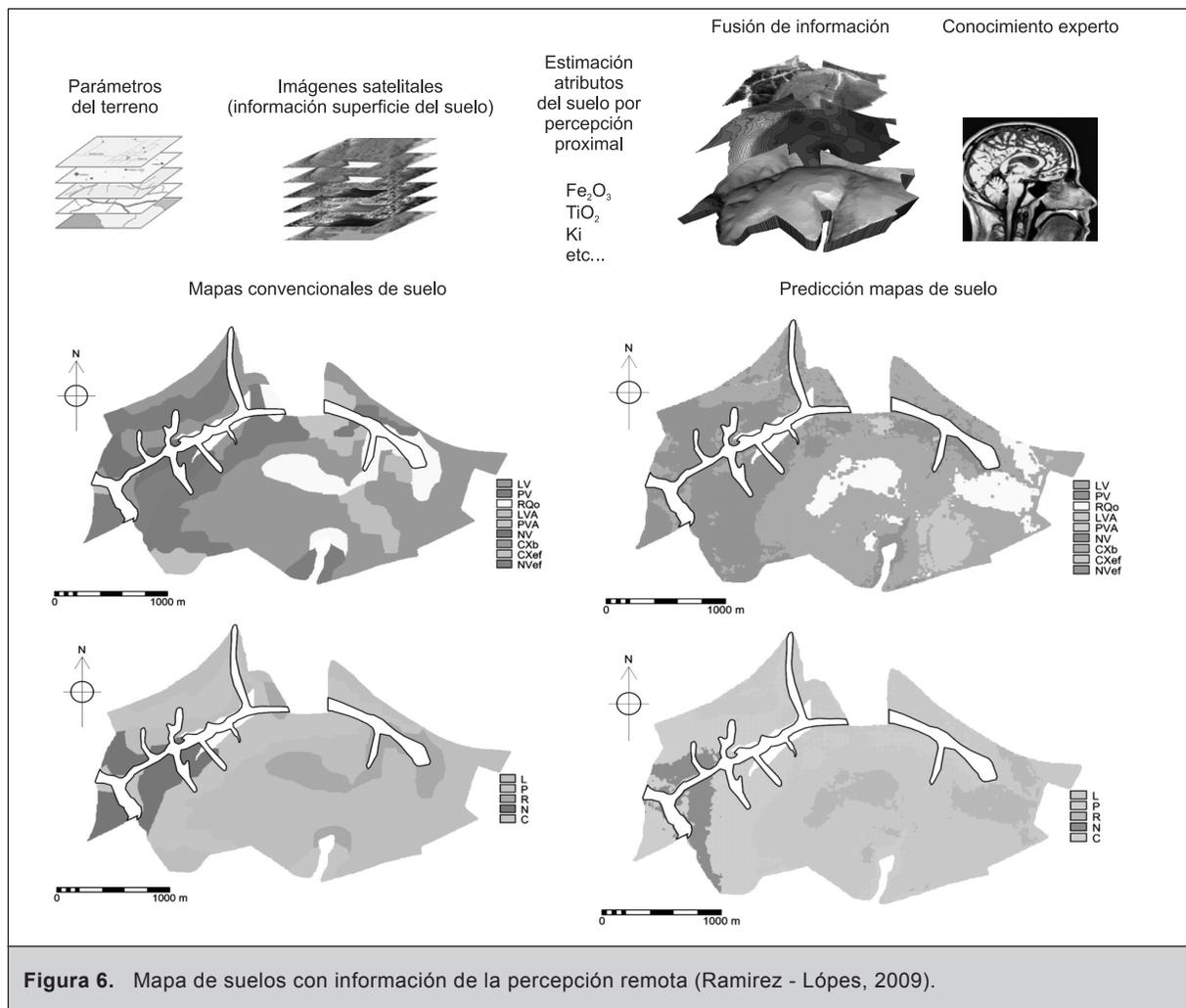
Otra técnica para obtener información es el mapeo de suelos con información de percepción remota. Se tienen parámetros del terreno de cierta área, luego se toman los parámetros de las imágenes satelitales y las muestras de los suelos en el campo y se hace la cuantificación de todos los elementos, y se fusiona toda

esta información. En la Figura 6 se observa el mapa de suelos de un área hecho con esta información por medio de la percepción remota y del GIS. Se compara con el método convencional y lo que se obtiene es el 69% de precisión en este estudio. Cada tipo de suelo tiene una dinámica específica con el agua, con los nutrientes y con el clima y eso está relacionado directamente con la productividad, entonces se puede tratar como una sola cosa.

Otra de las aplicaciones con el satélite es el mapeo del contenido de hierro (Figura 7). El mapeo de la Figura 7 se hizo con un satélite que tenía una correlación del 67% con el hierro y se realizó con un sensor que tenía una correlación de 82%. Esta información de la superficie está relacionada con la clasificación de los suelos y puede ayudar al manejo de los suelos, por ejemplo, en la fertilización con fósforo.

Algo muy importante es que no siempre se tiene suelos sin vegetación, entonces esto se puede hacer, por ejemplo, en caña de azúcar.

En la Figura 8, por ejemplo, se ve en blanco los suelos que no están expuestos y los otros que sí están expuestos. Donde se tiene este problema, se obtienen



imágenes de diferentes estaciones y al final aparece como un mosaico con toda el área de los suelos expuestos. En este experimento se hizo la correlación y se obtuvo el 70% de coincidencia de la espacialización de la textura a través del satélite.

Se pasa entonces de la estrategia de los suelos a la estrategia de las plantas. Los puntos rojos que se observan en la Figura 9 son recolectados como un patrón para saber cuál es la textura y el contenido de materia orgánica. Con el patrón se inserta un software de clasificación y se obtiene la textura del suelo más la materia orgánica del mismo. Estas dos informaciones están directamente relacionadas con los sitios, entonces se fusiona la recomendación de los herbicidas, dando como resultado 16% de economía en herbicidas.

La espacialización de los atributos de los suelos es muy importante. En la Figura 10 se observa un área

de 500 hectáreas, entonces se marcan 500 puntos y se toman los análisis de las muestras de suelo en los sensores y en el laboratorio, y se tiene R^2 , que son muy altos para la cuantificación de algunos atributos, y con esto se hace la espacialización y los mapas. Se puede observar que los mapas obtenidos, gracias al análisis de laboratorio, son muy similares a los obtenidos utilizando sensores. El resultado del impacto fue de 64% del costo más bajo en el análisis de los suelos y esto es muy importante en la agricultura de precisión.

En el manejo químico de los suelos es importante ver la relación entre la aplicación de cal. En este experimento había suelos con diferentes cantidades de cal estimado por medio de los sensores y tenía unos requerimientos de cal muy bien correlacionados con lo que se había estimado en el análisis de suelo de laboratorio (Figura 14).

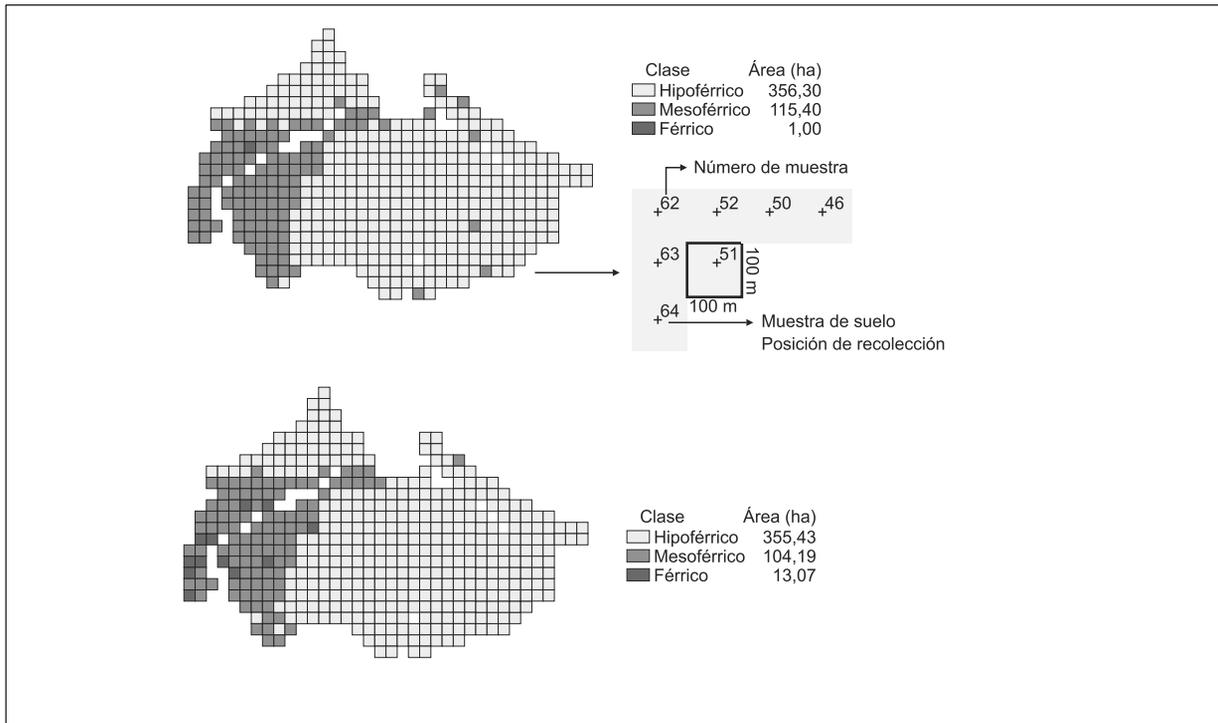


Figura 7. Mapeo del contenido de hierro (Dematté; Fiorio; Ben-Dor, 2009).

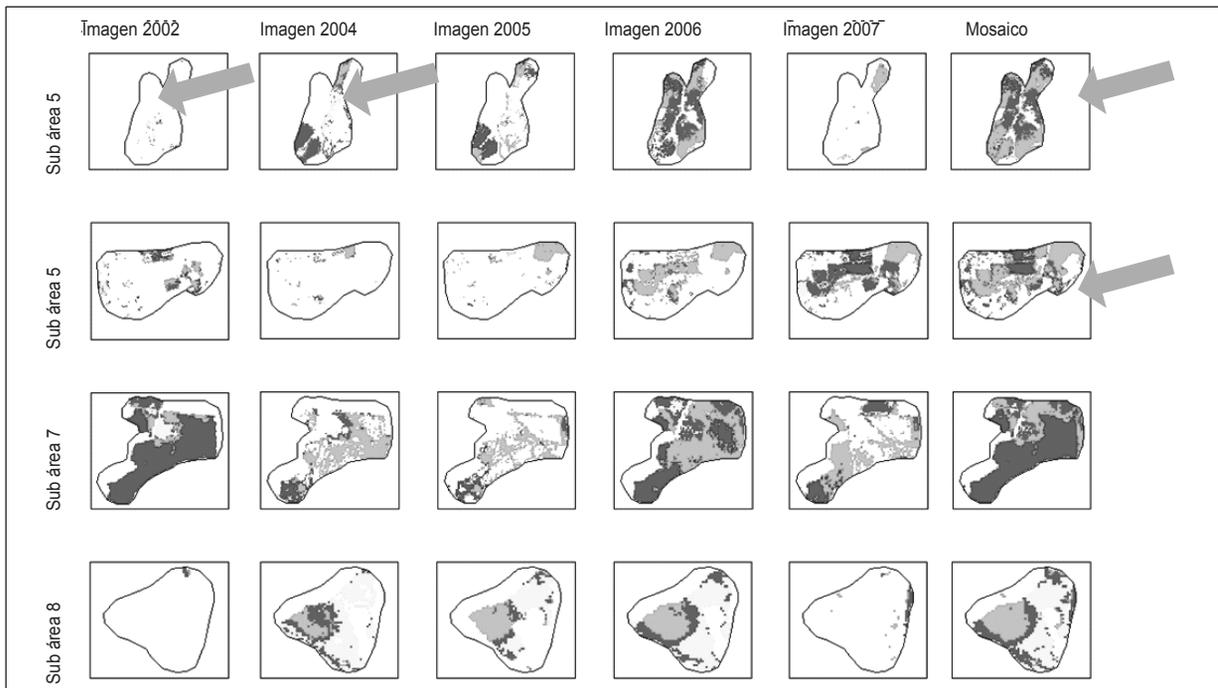


Figura 8 Información continua de suelo desnudo por medio de imágenes orbitales en áreas agrícolas (Alves, 2009).

Con relación a las plantas, con los sensores se puede detectar plagas, por ejemplo, en cítricos (Figura 12). Se observa las imágenes que detectan las áreas y producen

mapas de GIS y con esto se logra un impacto. Se pudo determinar que la aplicación variable de pesticidas indicaba una reducción de 92% en la contaminación.

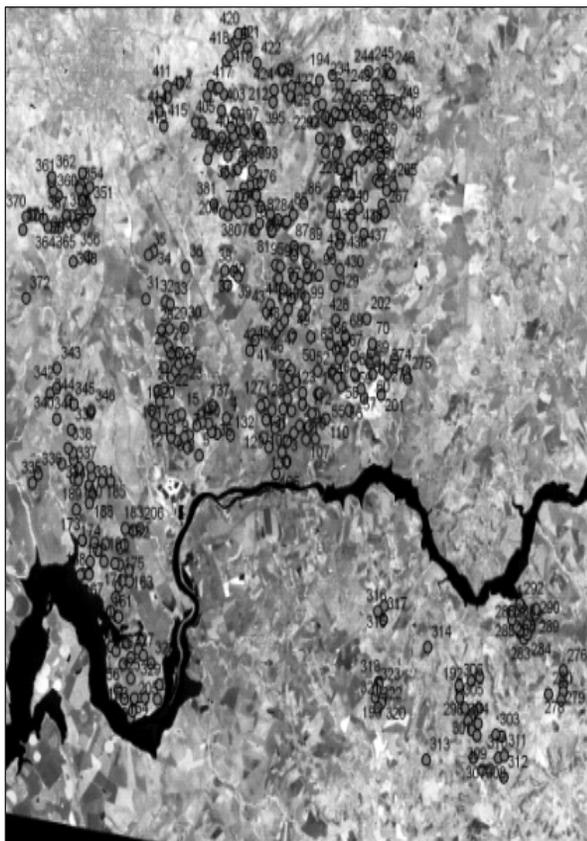


Figura 9. Planeación de aplicación de herbicidas (Demattê *et al.*, 2009).

Otra de las aplicaciones es el monitoreo de crecimiento hiperespectral (Figura 13). Se puede ver una alta correlación entre el índice de área foliar y las imágenes aéreas. Se puede monitorear el rendimiento a lo largo de las diferentes etapas de crecimiento.

Las imágenes satelitales se pueden usar como resultado primario (Figura 14). Se muestran imágenes clasificadas por la parte superior donde da una excelente relación entre la biomasa y el NDVI. De hecho, en la caña de azúcar se hace el cálculo de la productividad de esta forma. El GNDVI, que es otro índice, es un mejor estimado para concentración de clorofila.

La Figura 15 muestra un mapa de rendimiento real. Cada línea representa una de las plantas y los espectros de cada una son diferentes. Esta es información completamente nueva del grupo de la sección de investigaciones en Colombia. Son varias curvas espectrales de la palma de aceite y se ve que las posiciones son diferentes en cuanto al espectro cuando se tienen plantas sanas y cuando se tienen plantas enfermas.

La Figura 16 muestra las áreas clasificadas, se observan las áreas sanas y las plantas enfermas. O sea, que se puede tener 83% de correlación en la detección mediante la información hiperespectral aérea.

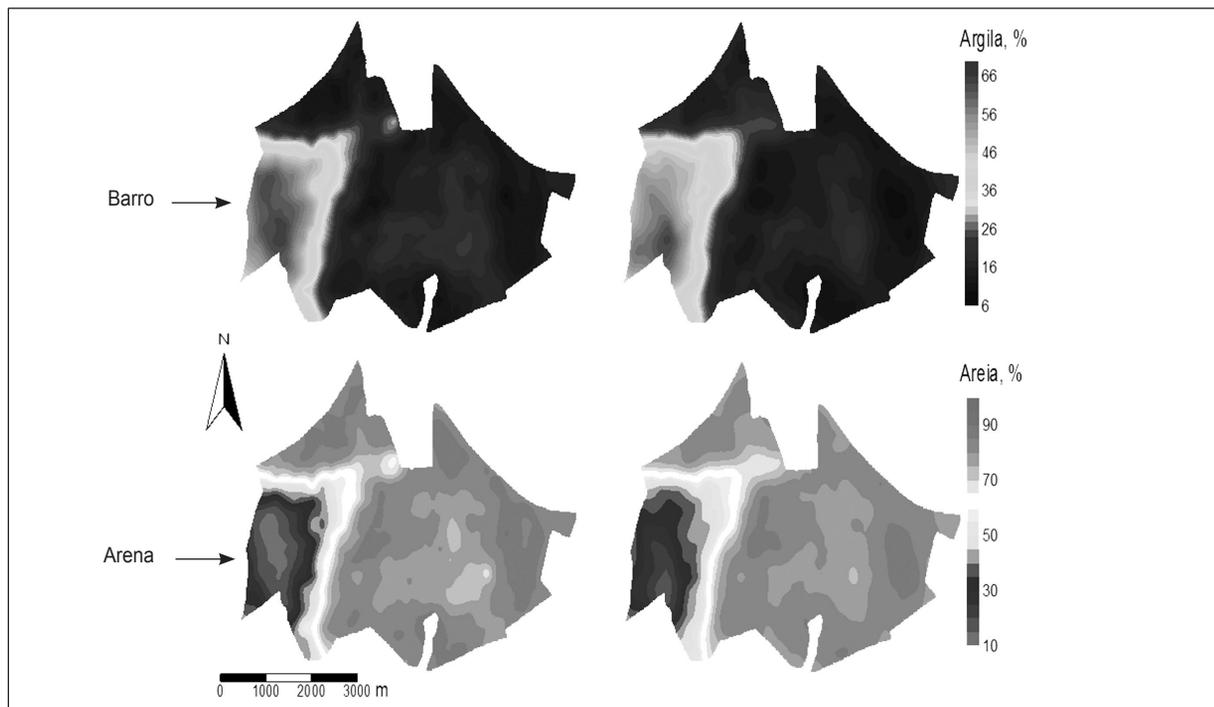
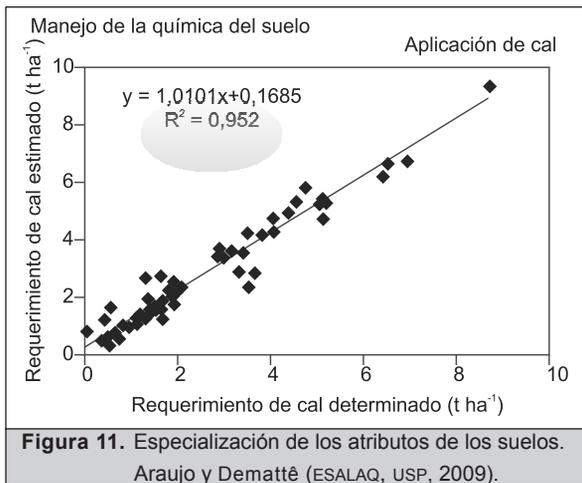
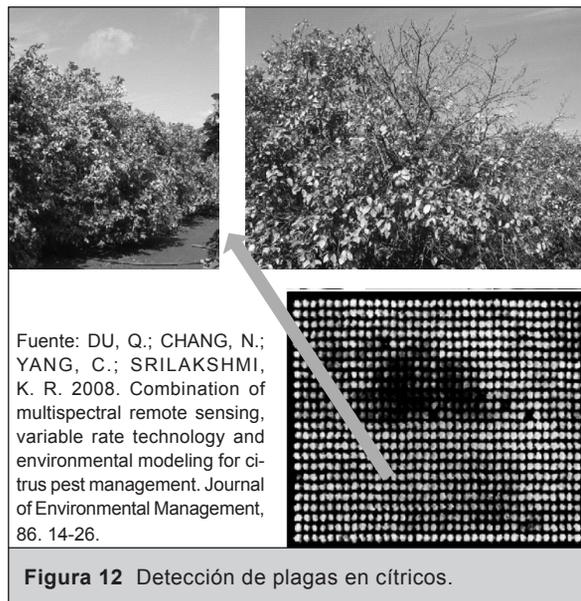


Figura 10. Espacialización de los atributos de los suelos.



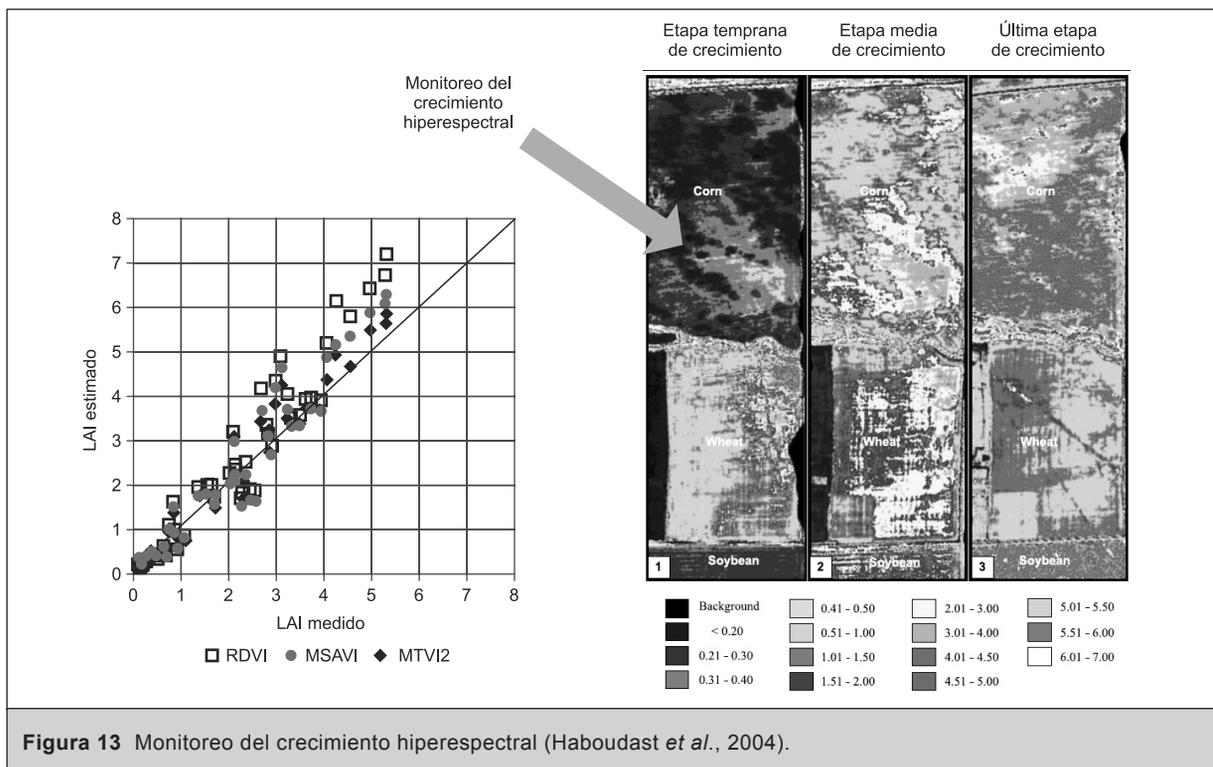
La modelación de la biomasa de la palma de aceite a partir de información del satélite Ikonos (Figura 17), muestra muy buen R², entre la masa seca y la información de reflectancia o la masa de humedad y la información de reflectancia. Se concluyó que el impacto sería en la dinámica de la captura de carbono y en el manejo de agua de la plantación.

Otra de las aplicaciones es la identificación de plagas por medio de imágenes satelitales. Se ha experimentado en caña de azúcar, las personas van al campo y ha-



cen la georreferenciación de los lugares y luego toman la imagen satelital y muestra el lugar ya identificado. Luego se analiza la imagen y se hace el monitoreo del área y, si hay alguna duda, las personas vuelven al campo para revisar lo que está pasando.

Todo lo anterior lleva a la necesidad de tener unos bancos de datos muy grandes de patrones espectrales.



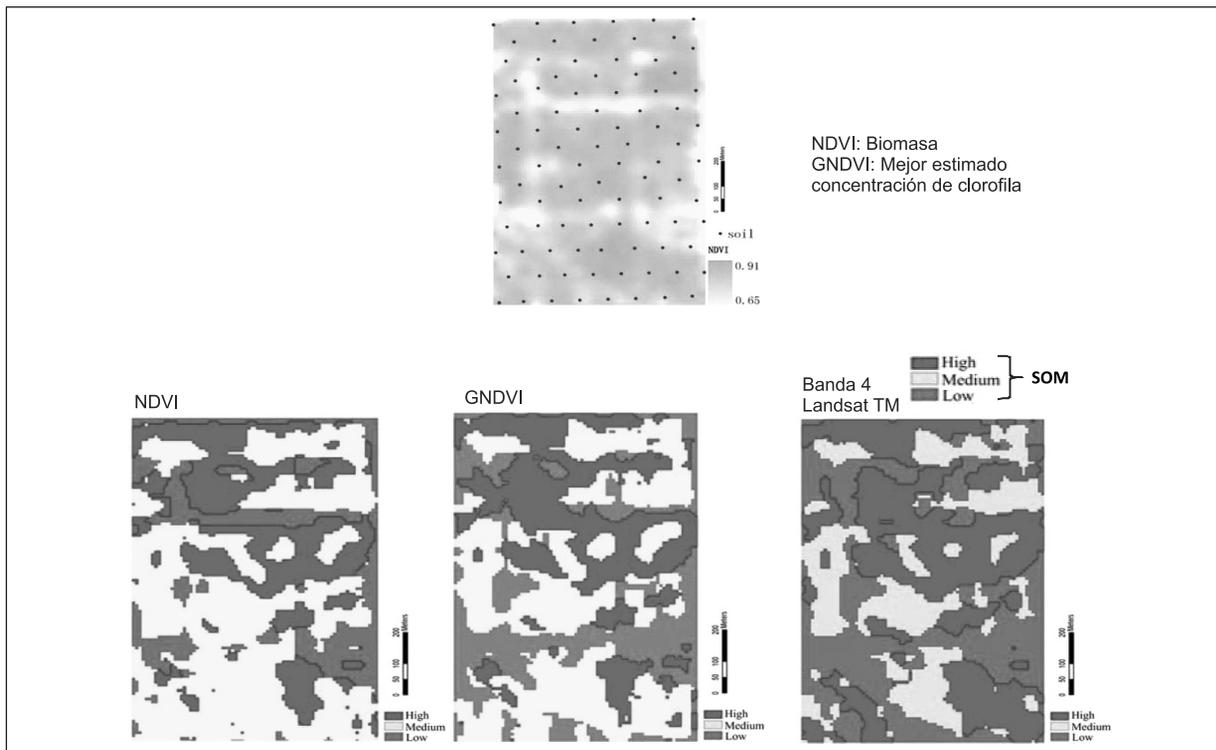
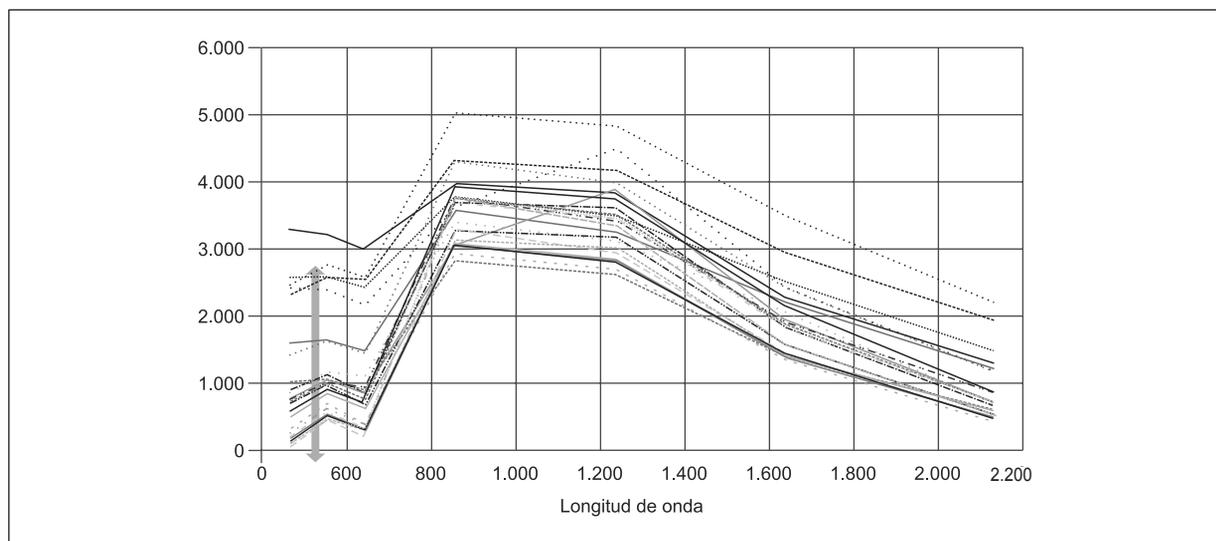


Figura 14. Imagen satelital como un resultado preliminar.



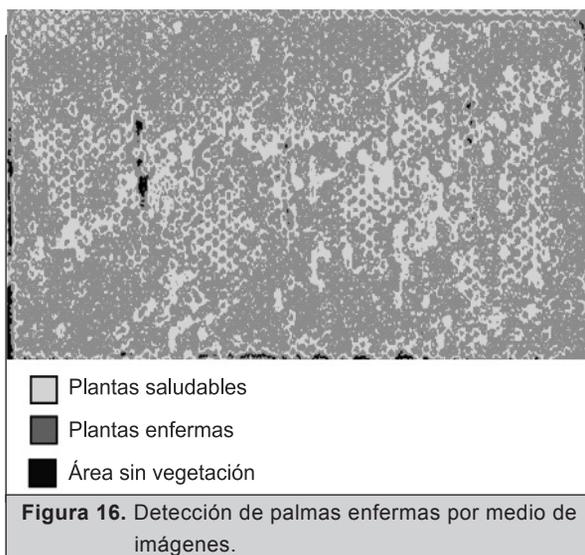
Fuente: Coordinación Grupo Investigación, Cenipalma, Programa Agronomía, Sección Agricultura de Precisión, Colombia

Figura 15. Curvas espectrales satelitales de palma de aceite y enfermedades de las plantas (Sbrafi y Handam, 2009).

Entonces, es posible que se presente una confusión espectral, el procesamiento de imágenes puede ser un problema, para ello se requieren bases de datos históricas y más expertos.

Futuro de la percepción remota

Siempre he sostenido que para ver el futuro es bueno ver el pasado también y el pasado son las publicaciones sobre percepción remota en el transcurso de los



años, en los periódicos más importantes, pero hubo una especie de estancamiento histórico en las publicaciones y esto se dio porque, si bien la percepción remota es una buena herramienta, en ese momento no se tenía el *software* que ayudara a extraer la información requerida. Hoy se cuenta con nuevo *software* para poder hacer este procedimiento y se puede ver el aumento de las publicaciones que están saliendo alrededor del mundo.

Ahora se tienen nuevos satélites hiperespectrales que dan información de objetivos sobre diferentes rangos espectrales (Tabla 1).

Hay nuevos sensores que ya se están construyendo y están listos para trabajar. Uno de los más importantes es EnMAP de Alemania, que tendrá alrededor de 200

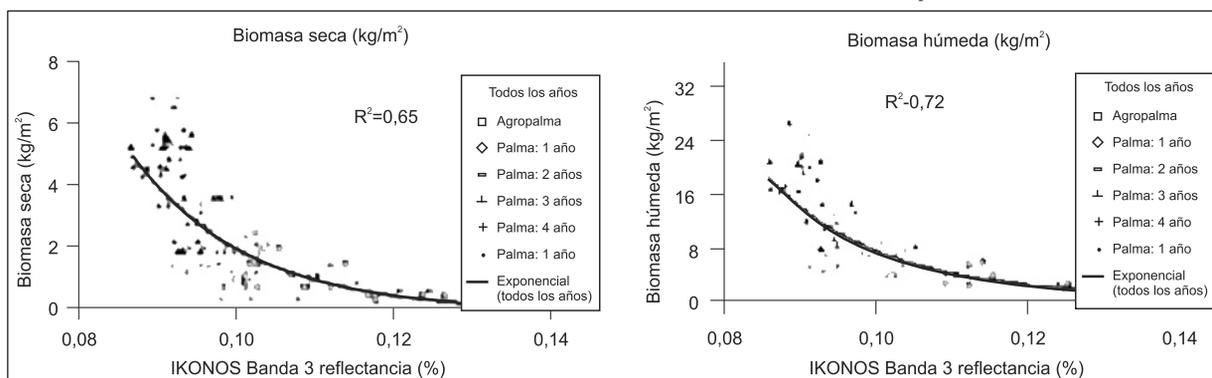


Tabla 1. Nuevos satélites hiperespectrales				
Sensores Orbitales	Fabricante	No. bandas	Interv. Espectr. Res. Espacial	Situación
MSMI Sat. Multi-Sensor Micro Satellite Imager	SunSpace South Africa	200	0,40-2,40 14m 15 km swath	2008
EnMAP Environmental Mapping & Analysis Program	OFZ-Potsdam/DLR Kayser-Threde Alemania	184-218	0,42-2,45 30m 30km swath	Fase B 2011
HYPER	ERSDAC/JAXA Japón	220	0,40-2,50 30m 50km swath	Fase B 2011
HyspIRI Hyperspectral Infrared Imager	NASA EUA	210 (+ 5 bandas TIR)	0,40 – 2,50 45m 90km swath	2013-2016
HERO Hyperspectral Environment & Resources Observer	Canadian Space Agency / MDA	210	0,4 – 2,5 30m	Fase A Sem previsão ??

bandas y será muy importante para poder analizar los objetos.

Otras investigaciones incluyen la estrategia por tipo de suelo. Se puede llevar el sensor en los tractores, que ya se está haciendo en Estados Unidos y en Australia, se capta la reflectancia y con esto obtienen información de qué hay en el suelo, para hacer la aplicación en tiempo real, que es el enfoque principal.

Si se quiere obtener información no solo del suelo sino también de las plantas, existe otra estrategia. Hay sensores en los tractores que reciben las luces de reflectancia de las plantas para la aplicación, por ejemplo, de nitrógeno (Figura 18). Se observan tres fases: la medición, la transferencia de datos y la aplicación, y esto se da en tiempo real.

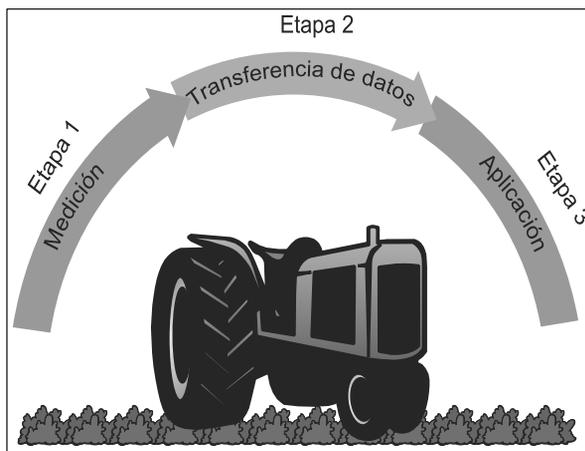


Figura 18 Percepción proximal Vis-NIR por estrategia de planta.

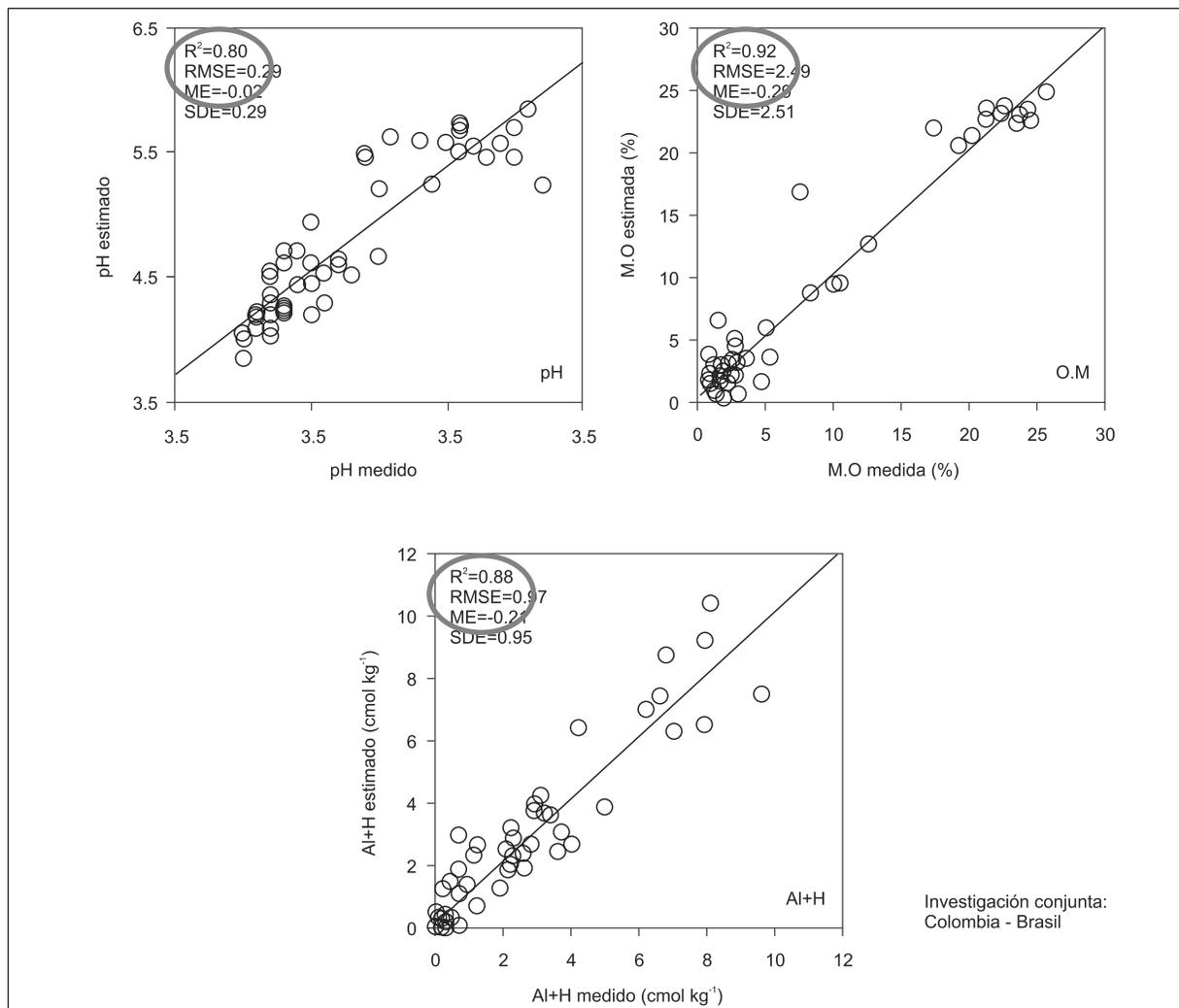


Figura 19. Patrones espectrales de algunos suelos en Colombia.



Consideraciones finales

Hay dificultades todavía para incorporar estas técnicas en los sistemas agrícolas, principalmente debido al alto costo de implementación y la necesidad de expertos. Todavía se requiere mucha investigación para su implementación en tractores para hacer los análisis de suelos. Esto se está haciendo de manera muy precisa y los resultados han sido muy buenos. El trabajo en el campo es importante para lograr los patrones, especialmente para la palma de aceite.

El hecho de poder entender la información de los satélites requiere de experiencia en los laboratorios. Aunque la percepción remota aporta mayor información y en forma más rápida, es muy importante comprender sus limitaciones en cada estrategia.

La gran ventaja que tenemos aquí es que de una información espectral podemos obtener varias informaciones porque tenemos sistemas estadísticos que nos ayudan a extraer la información.

La percepción remota en la agricultura es un hecho, pero no elimina el conocimiento del experto. El costo también dependerá del nivel y de la estrategia que se quiera utilizar.

La percepción remota ya está siendo utilizada en agricultura. La información obtenida por percepción remota es rápida, de bajo costo y con una buena calidad ambiental y hay un gran potencial en el uso de la percepción remota para la palma de aceite y el manejo de los suelos. Obviamente, se requiere más investigación sobre esto.

Existe un grupo mundial que está elaborando patrones espectrales y es la única forma de hacer que esto funcione; aún para las plantas necesitamos patrones.

Los primeros datos que tengo son de una investigación conjunta con Colombia. Se observan los patrones espectrales de algunos suelos en Colombia y se cuenta con la información estadística para poder cuantificar esos suelos con un R^2 muy alto para varios elementos (Figura 19).