



Foto: Andrés Hirigoyen

GEORRADAR COMO HERRAMIENTA DE APOYO A LA GESTIÓN FORESTAL: del conocimiento de las raíces a la toma de decisiones

Ing. Agr. Dr. Andrés Hirigoyen¹, Ing. Agr. PhD. Cecilia Rachid², Ing. Agr. Dr. Fernando Resquin², Ing. Agr. Dr. Gustavo Balmelli², Ing. Agr. Mag. Juan Pedro Posse²

¹Sistema Forestal, INIA Las Brujas

²Sistema Forestal, INIA Tacuarembó

En el marco del Sistema Forestal de INIA, estamos llevando a cabo el proyecto *GEORoots*, donde empleamos la tecnología del georradar de penetración de suelo (GPR en inglés) para investigar los sistemas radiculares de Eucaliptos. Mediante la emisión de pulsos electromagnéticos de alta frecuencia en el subsuelo y el análisis de las señales reflejadas, el GPR permite obtener imágenes detalladas de la distribución espacial de las raíces. La distribución espacial tridimensional de las raíces influye directamente en procesos ecológicos claves como la absorción de agua y nutrientes, la estabilidad del suelo, el almacenamiento de carbono y la respuesta de los árboles a perturbaciones ambientales.

GEORRADAR: UNA HERRAMIENTA ESENCIAL PARA LA SILVICULTURA DE PRECISIÓN

El georradar se ha consolidado como una herramienta valiosa para estudiar las raíces de los árboles desde finales de los años 90. Esta tecnología aprovecha el contraste en el contenido de agua entre las raíces y el

suelo circundante para generar imágenes que revelan la estructura y distribución de los sistemas radiculares. El GPR funciona emitiendo pulsos electromagnéticos hacia el subsuelo. Estos pulsos, al encontrarse con diferentes materiales (como raíces, rocas o cambios en la humedad), son reflejados, refractados o absorbidos en mayor o menor medida.



Foto: Andrés Hrigogien

Figura 1 - La antena (900 Hz) del GPR es el elemento clave del sistema. Su diseño y características eléctricas determinan la resolución espacial y la profundidad de penetración de las ondas.

La señal del GPR se desplaza a lo largo de un perfil, generando una serie de registros individuales que, al combinarse, forman una imagen en sección transversal. Las propiedades del suelo, como la humedad, la densidad y el contenido de partículas, influyen en la velocidad y la atenuación de las ondas electromagnéticas, lo que permite diferenciar distintos tipos de materiales.

La profundidad de penetración y la resolución de las imágenes dependen de la frecuencia de las ondas emitidas. Generalmente, se utilizan frecuencias entre 400 y 1500 MHz para estudiar la mayoría de los perfiles de suelo. Gracias a esta tecnología, es posible obtener información detallada sobre la distribución de raíces, la presencia de capas de suelo y otras características del subsuelo, sin la necesidad de realizar excavaciones.

Una vez detectadas las raíces, es posible extraer información cuantitativa sobre su tamaño, forma y distribución en el suelo. Esta información es fundamental para comprender el crecimiento de las plantas y evaluar la salud de los ecosistemas forestales. El GPR se presenta como una alternativa no destructiva a los métodos tradicionales de excavación para la detección de raíces. A diferencia de estas técnicas invasivas, el GPR permite examinar los sistemas radiculares sin dañar ni las raíces ni el suelo, lo que facilita el seguimiento a largo plazo y la realización de estudios repetidos en el mismo sitio. Los métodos tradicionales para estudiar las raíces, como la excavación y el lavado de raíces, son destructivos y laboriosos, lo que limita su aplicación a escala.

Las principales limitaciones del GPR son: 1) la heterogeneidad del suelo: suelos con alta variabilidad en cuanto a contenido de agua, presencia de rocas u otros objetos pueden dificultar la interpretación de las imágenes; 2) la profundidad máxima de exploración depende de la frecuencia de la antena y las características del suelo; y 3) la resolución: la resolución de las imágenes puede ser limitada para raíces muy finas o cercanas entre sí.

Ventajas del GPR:

- **No destructivo:** permite realizar múltiples mediciones en el mismo sitio sin dañar el sistema radicular ni el suelo circundante.
 - **Alta resolución:** proporciona imágenes de alta resolución que revelan la arquitectura de las raíces en tres dimensiones.
 - **Rápido y eficiente:** reduce significativamente el tiempo y los costos asociados a los métodos tradicionales.
 - **Versátil:** se puede aplicar en una amplia variedad de condiciones de suelo y vegetación.
 - **Información detallada:** brinda imágenes que revelan la profundidad, tamaño y distribución de las raíces.
 - **Repetibilidad:** permite realizar mediciones repetidas en el mismo sitio para monitorear el crecimiento de las raíces a lo largo del tiempo.
- Esta metodología permite:
- **Evaluar la exploración radicular:** conocer la profundidad y extensión de las raíces, así como su distribución en el suelo.
 - **Caracterizar raíces:** determinar el diámetro, volumen, biomasa, distribución y densidad de las raíces.
 - **Estimar la biomasa radicular:** cuantificar la cantidad de biomasa almacenada en las raíces.
 - **Relacionar la sanidad del árbol con su sistema radicular:** identificar posibles correlaciones entre el estado sanitario del árbol y las características de sus raíces.

Desde INIA se encuentra en marcha un proyecto para analizar la viabilidad de esta tecnología en plantaciones comerciales de *Eucalyptus smithii* jóvenes.

- Evaluar propiedades del suelo: además del estudio de las raíces, el GPR permite evaluar algunas propiedades del suelo, como el contenido de agua, salinidad y analizar su estructura.

- Monitorear dinámicas de crecimiento: seguir la evolución de los sistemas radiculares a lo largo del tiempo.

El uso del GPR en el estudio de las raíces implica:

1 - Adquisición de datos: se realizan escaneos del suelo utilizando antenas GPR de alta frecuencia en los sitios seleccionados obteniendo información sobre el largo y grosor de raíces.

2 - Procesamiento de imágenes: las señales recibidas se procesan mediante *software* especializado para generar imágenes en una sección transversal del subsuelo. Estas imágenes revelan la distribución y densidad de las raíces en diferentes profundidades.

3 - Obtención de información para validación en campo: se realiza excavando calicatas en los mismos sitios donde se realizaron los escaneos para extraer y medir el volumen y la biomasa de los sistemas radiculares.

4 - Desarrollo de modelos predictivos: se establecen relaciones entre los datos obtenidos del GPR y las mediciones directas en campo, con el objetivo de desarrollar modelos que permitan estimar el volumen y la biomasa de las raíces a partir de las imágenes del GPR. Estos modelos también pueden relacionarse con el estado sanitario de los árboles.

DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de sus ventajas, el uso del GPR en el estudio de las raíces presenta algunos desafíos, como la interpretación de las imágenes en suelos heterogéneos y la necesidad de calibrar los equipos para diferentes condiciones. Sin embargo, los avances tecnológicos y el desarrollo de nuevos algoritmos están superando estos obstáculos. Por ejemplo, el aprendizaje automático ha emergido como una herramienta poderosa para esta tarea, permitiendo una detección más rápida y precisa.



Foto: Andrés Hirdogagen

Figura 2 - Uso del radar de penetración terrestre en una plantación de eucaliptos. El GPR emite ondas electromagnéticas que penetran el suelo, generando imágenes de las raíces y otras características subterráneas.

Técnicas como Faster-RCNN y YOLOv5s se han aplicado con éxito en este campo.

En el futuro, se espera que el GPR se convierta en una herramienta estándar para la investigación forestal, permitiendo una mejor comprensión de la dinámica de los ecosistemas forestales y contribuyendo a una gestión más sostenible de los recursos forestales. Sin embargo, la estimación del diámetro de las raíces aún presenta desafíos, especialmente para raíces de pequeño diámetro. Los avances en el procesamiento de imágenes y el desarrollo de nuevos algoritmos son fundamentales para mejorar la resolución y la precisión de esta técnica.

Se espera que el GPR se convierta en una herramienta estándar para la investigación forestal, permitiendo una mejor comprensión de la dinámica de los ecosistemas forestales y contribuyendo a una gestión más sostenible de los recursos.

El procesamiento de imágenes GPR, combinado con técnicas de aprendizaje automático, ofrece una herramienta valiosa para el estudio de las raíces en plantaciones forestales. Sin embargo, es necesario continuar investigando para mejorar la precisión y la eficiencia de estos métodos. Este es un enfoque no destructivo y eficiente para la caracterización detallada y precisa de los sistemas radiculares que contribuye a una mejor comprensión de los procesos ecológicos y a la gestión sostenible de los recursos forestales.