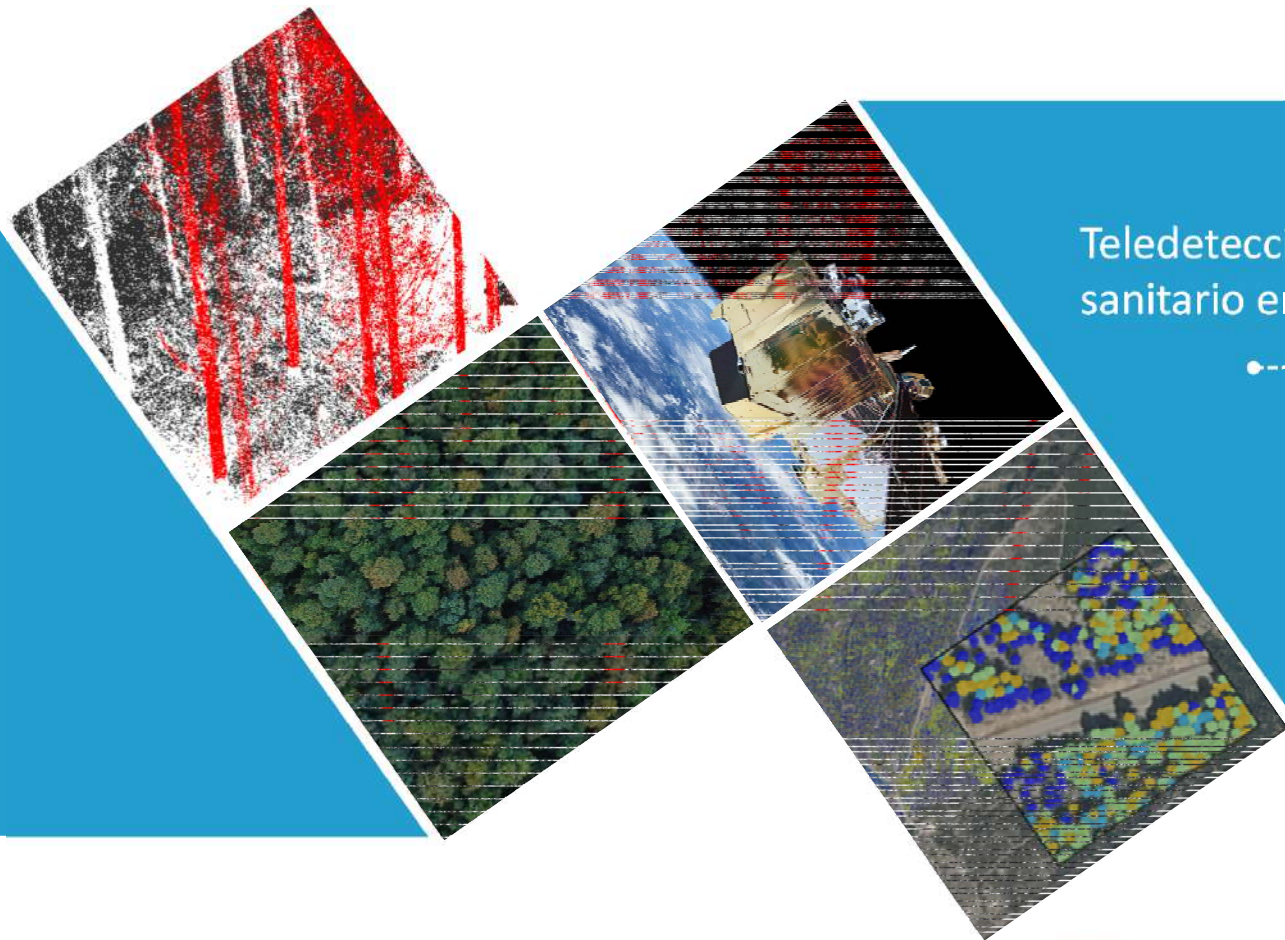




Teledetección multifuente para el diagnóstico sanitario en ecosistemas forestales.

Rafael M^a Navarro Cerrillo
Departamento de Ingeniería Forestal
Universidad de Córdoba

12 de febrero de 2026 (Huelva)

Selvicultura en un contexto de cambio global



¿Qué selvicultura prepara mejor a los ecosistemas forestales para el cambio climático? Para los gestores forestales, la pregunta no es cómo manejar los bosques en el futuro, sino qué pueden hacer hoy para adaptar los bosques a los cambios observados en la idoneidad del hábitat de las especies, en el comportamiento de las plagas y enfermedades, y en la frecuencia creciente de sequías y otros factores de estrés.

Evolución y crisis de la sanidad forestal en España (1980-2020)

MOTORES DEL DETERIORO SANITARIO

- **Sinergia de cinco factores críticos**
El clima, baja actividad selvícola, abandono de control integrado, normativas contraproducentes y especies exóticas.



El clima, baja actividad selvícola, abandono de control integrado, normativas contraproducentes y especies exóticas.

Estrés hídrico y térmico acumulado
1985-1996:
Periodo extremadamente seco



Debilitamiento fisiológico de las masas de *Quercus* y *Pinus*.

Gestión selvícola deficiente
La espesura excesiva y el envejecimiento aumentan la vulnerabilidad ante organismos oportunistas.



Estrés Hídrico

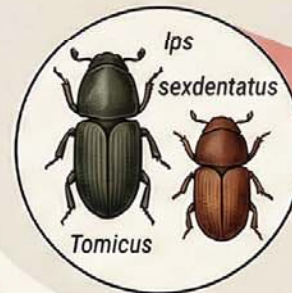
Debilidad de Savia



Ataque de Perforadores

IMPACTO DE PLAGAS Y PATÓGENOS

- **Perforadores: La amenaza más letal**
Insectos como *Ips sexdentatus* y *Tomicus* aprovechan el bajo flujo de savia para colonizar árboles.



- **Invasiones biológicas y enfermedades**
Representan riesgos críticos de desaparición de especies.



Grafiosis agresiva
Riesgo crítico de extinción local

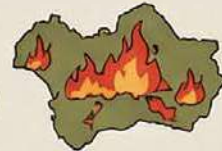


Nematodo del pino
Representan riesgos desaparición de especies.

- **Decenios de expansión descontrolada**

>40,000 hectáreas

en Andalucía (1995-2001) de pinar afectados por perforadores de tronco.



DATOS DOCUMENTADOS DE IMPACTO

Ips sexdentatus

(Zamora, 1992)



450
focos eliminados

en **8,500 ha**

Tomicus destruens

(Andalucía, 1995-2001)



>40,000 ha
de pinar afectadas

Marssonina brunnea

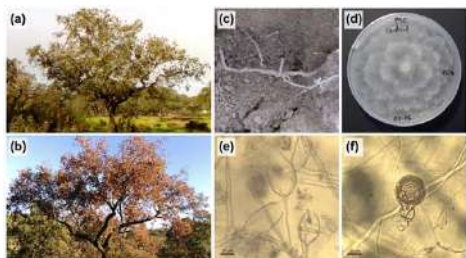
(Castilla y León, 1997)



Defoliaciones severas

en **6,000 ha**

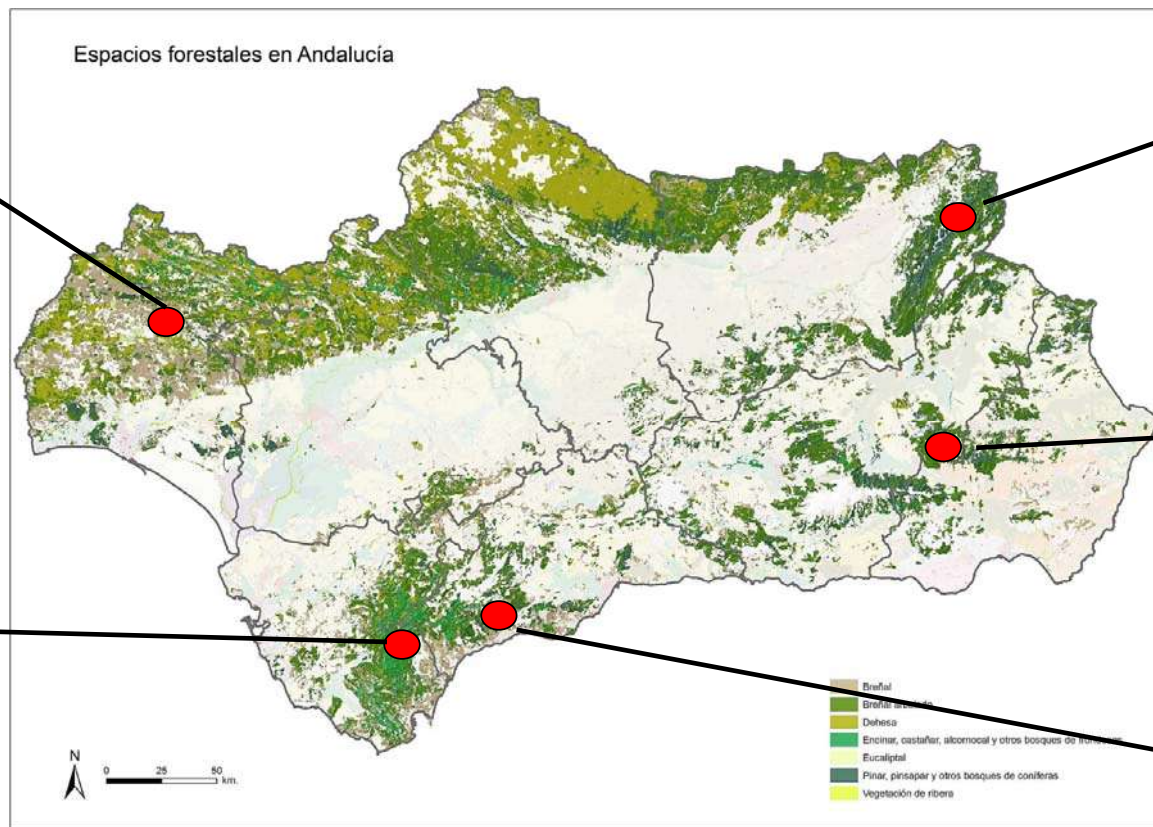
La Sanidad de los ecosistemas forestales andaluces



Sanidad de la dehesa



Sanidad del monte alcornocal"



Plagas en pinares naturales



Decaimiento de masas artificiales



Multicausalidad en pinsapares



Sanidad forestal y teledetección



Sanidad forestal y teledetección



Desafío de la heterogeneidad forestal: del campo al sensor

LIMITACIONES DEL MUESTREO MANUAL

Intensivo en costos y mano de obra

La recolección de datos en campo depende de inspecciones visuales subjetivas y procesos lentos.

Limitación espacial y temporal

El muestreo se restringe al nivel de parcela con periodos de repetición de años.

Dificultad de detección temprana

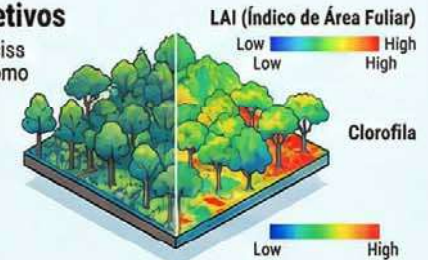
Resulta casi imposible detectar cambios abruptos en el ecosistema de manera oportuna.



VENTAJAS DE LA TELEDETECCIÓN FORESTAL

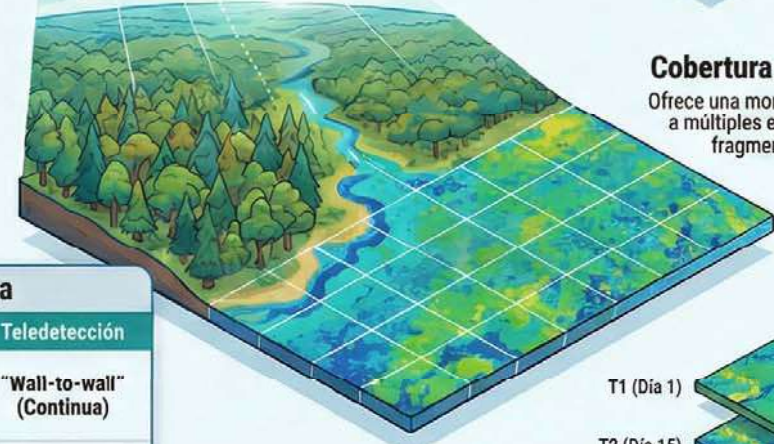
Datos biofísicos objetivos

Proporciona información precisa sobre el estado fisiológico, como niveles de LAI y clorofila.



Cobertura "Wall-to-wall"

Ofrece una monitorización continua a múltiples escalas, superando la fragmentación del muestreo tradicional.



Alta frecuencia temporal

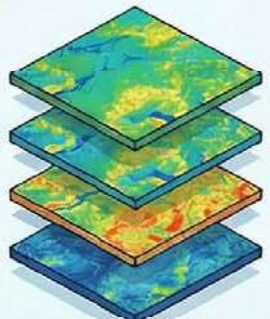
Permite un seguimiento repetitivo y rentable para decisiones económicas y ambientales informadas.

T1 (Día 1)

T2 (Día 15)

T2 (Día 15)

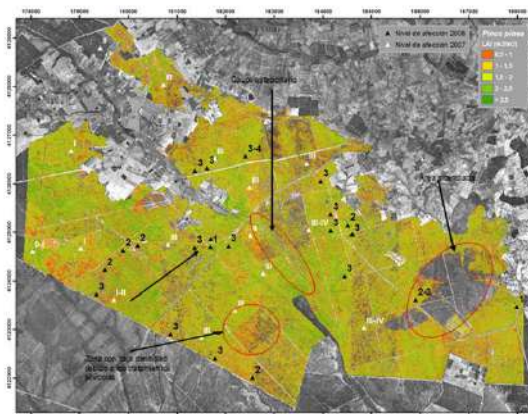
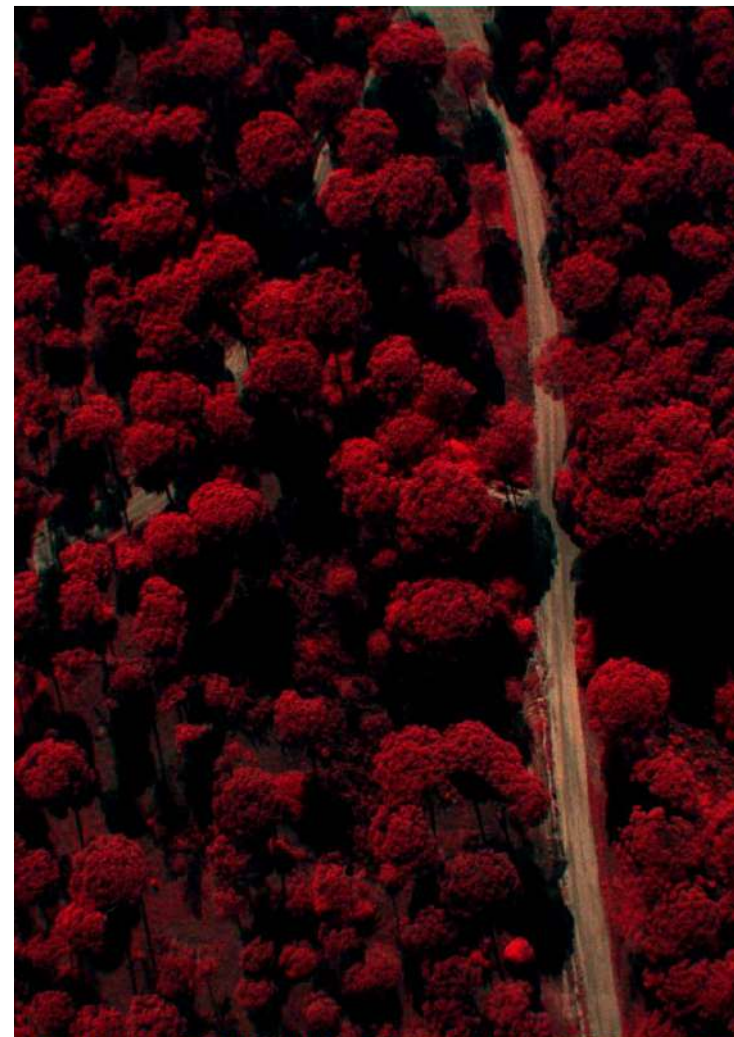
T3 (Día 30)



Comparativa Técnica

Característica	Muestreo Manual	Teledetección
 Escala	Nivel de parcela (Limitada)	"Wall-to-wall" (Continua)
 Objetividad	Subjetiva (Visual)	Física y objetiva
 Frecuencia	Larga (Años)	Alta frecuencia temporal

Desafío de la heterogeneidad forestal: el “dato con botas”



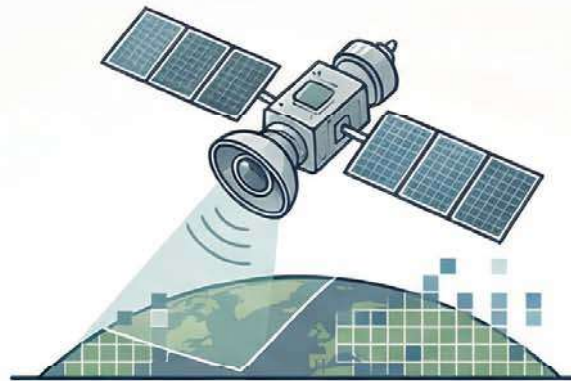
9/61

Teledetección: del sensor al usuario



Interacción de Energía

La energía de una fuente fluye por la atmósfera e interactúa con la superficie terrestre.



Captura por Sistema Sensor

Los sensores satelitales detectan la energía reflejada o emitida por los objetos de estudio.



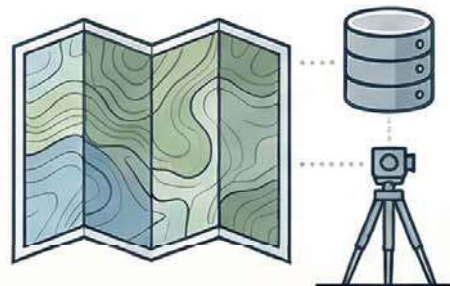
Transmisión y Almacenamiento

Los datos capturados se envían a estaciones terrestres para su procesamiento en servidores.



Tratamiento Digital y Visual

Aplicación de procesos computacionales e interpretación experta para extraer valor de los datos.



Datos de Referencia y Control

Uso de información auxiliar sobre el objeto de estudio para asegurar la precisión.



Productos de Información para Usuarios

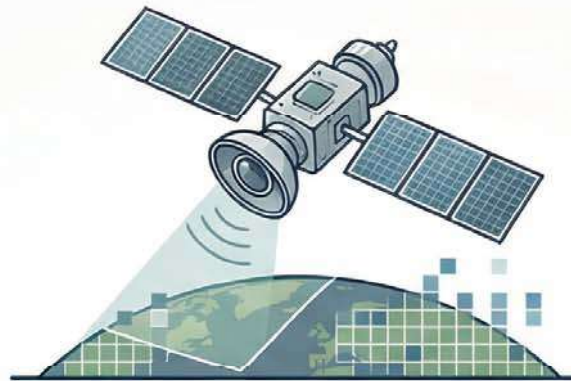
Generación de mapas y reportes finales destinados a la toma de decisiones.

Teledetección: del sensor al usuario



Interacción de Energía

La energía de una fuente fluye por la atmósfera e interactúa con la superficie terrestre.



Captura por Sistema Sensor

Los sensores satelitales detectan la energía reflejada o emitida por los objetos de estudio.



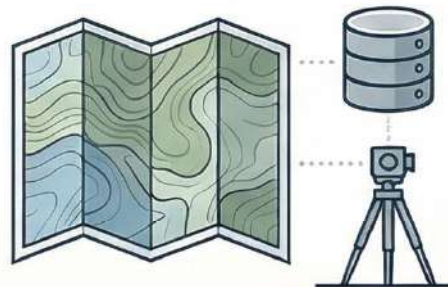
Transmisión y Almacenamiento

Los datos capturados se envían a estaciones terrestres para su procesamiento en servidores.



Tratamiento Digital y Visual

Aplicación de procesos computacionales e interpretación experta para extraer valor de los datos.



Datos de Referencia y Control

Uso de información auxiliar sobre el objeto de estudio para asegurar la precisión.



Productos de Información para Usuarios

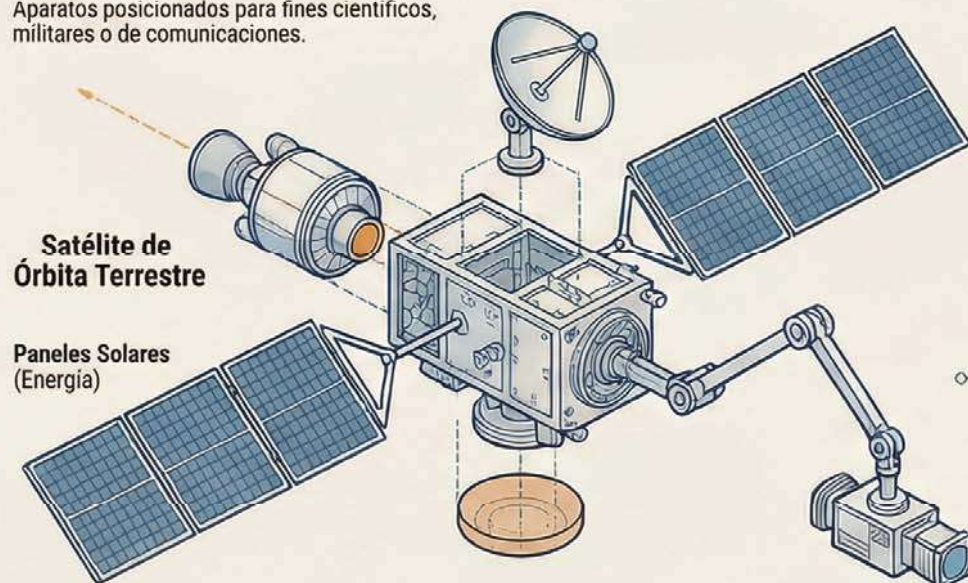
Generación de mapas y reportes finales destinados a la toma de decisiones.

Plataformas y sensores: los “nuevos” ojos

Satélites y Plataformas

Vehículos en Órbita Terrestre

Aparatos posicionados para fines científicos, militares o de comunicaciones.



Satélite de Órbita Terrestre

Paneles Solares (Energía)

Diversidad de Plataformas

Además de satélites, los sensores pueden ser transportados por aeronaves y drones.



Aeronave



Dron (UAV)

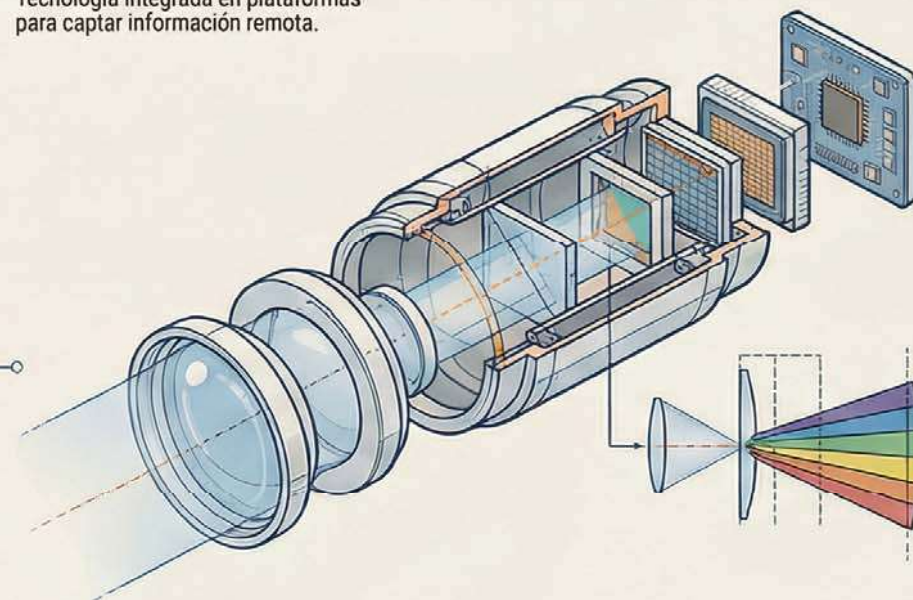


Globo Estratosférico

Sensores y Captura Espectral

Adquisición de Imágenes a Distancia

Tecnología integrada en plataformas para captar información remota.



Canales y Bandas Espectrales

Regiones específicas del espectro captadas por el sensor para generar datos.

Canal Azul (Visible)

Canal Rojo (Visible)

Canal NIR (Vegetación)

Canal TIR (Temperatura)

Sistema Plataforma-sensores RPAS



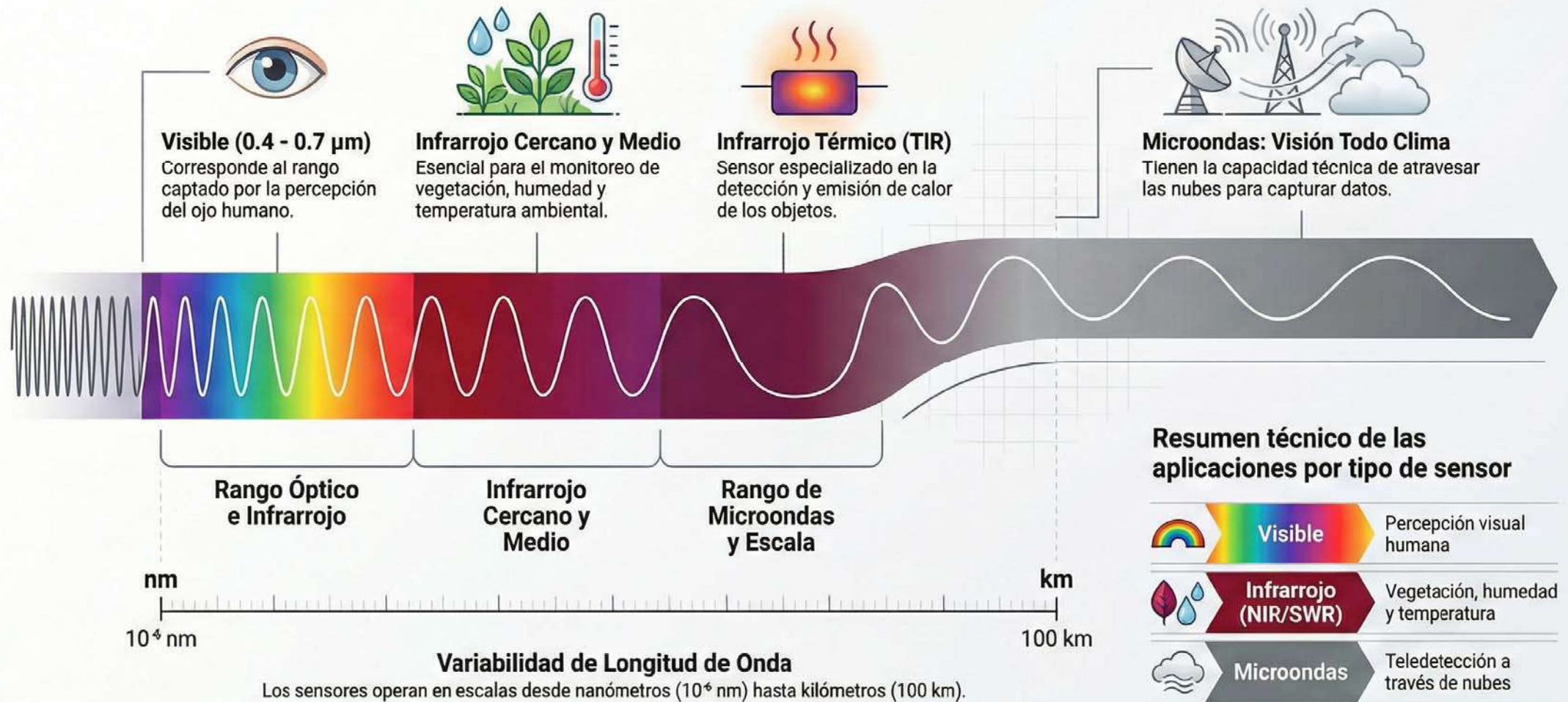
MicaSense RedEdge-MX



DJI Zenmuse XT 2

12/61

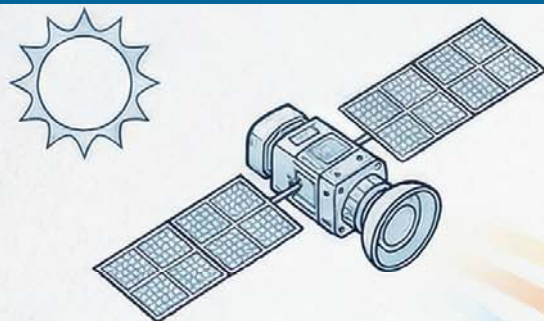
Plataformas y sensores: los “nuevos” ojos



Tipos de sensores

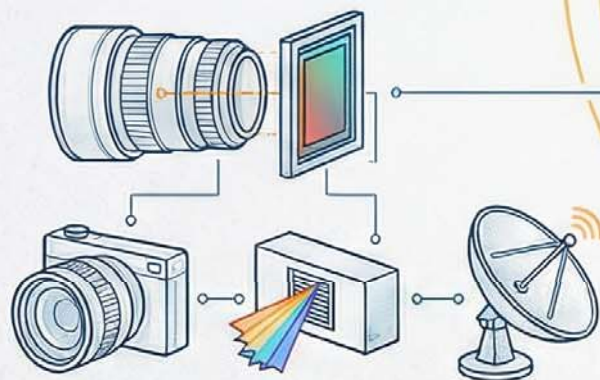
SENSORES PASIVOS

SENSORES ACTIVOS



DEPENDENCIA DE LA LUZ SOLAR

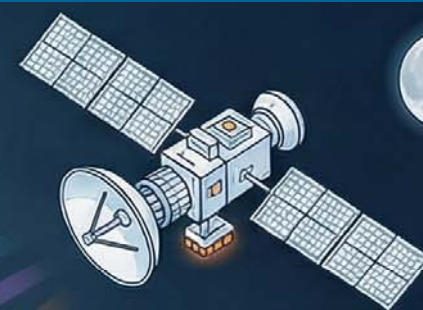
Captan la radiación emitida o reflejada naturalmente por la Tierra a partir del sol.



SISTEMAS ÓPTICO-ELECTRÓNICOS

Incluyen cámaras fotográficas, espectrómetros de imagen y radiómetros de microondas (antena).

COMPARATIVA TÉCNICA RÁPIDA		
CARACTERÍSTICA	SENSORES PASIVOS	SENSORES ACTIVOS
FUENTE DE ENERGÍA	Externa (Radiación solar)	Interna (Generación propia)
HORARIO OPERATIVO	Limitado a luz solar	Operan de día y de noche
INSTRUMENTOS CLAVE	Cámaras ópticas	RADAR, LiDAR



GENERACIÓN DE ENERGÍA PROPIA

Emiten su propia radiación y miden la respuesta rebotada desde la superficie.

AUTONOMÍA LUMÍNICA

Tienen la capacidad técnica de funcionar durante la noche sin luz externa.



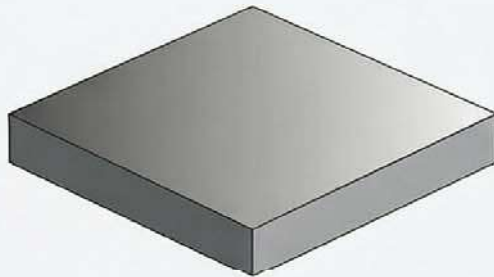
TECNOLOGÍA RADAR Y LiDAR

El sistema LiDAR utiliza tecnología láser para la detección y medición.

Sensores pasivos: del pancromático al hiperespectral

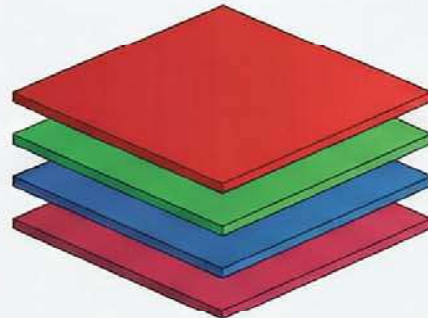
Sensores de Espectro Discreto

Sensor Pancromático (1 Banda)



Captura imágenes en escala de grises utilizando la luz solar en una sola banda.

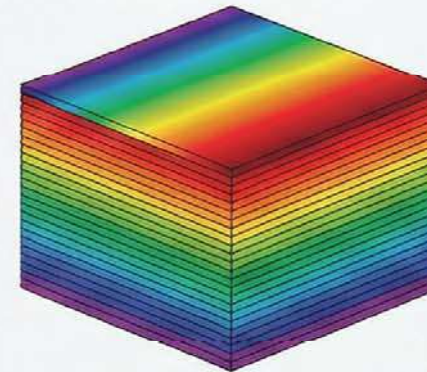
Sensor Multiespectral (Bandas Separadas)



Utiliza grupos de bandas separadas, común en misiones como Landsat y Sentinel.

Sensores de Alta Densidad Espectral

Sensor Hiperespectral (Cientos de Bandas)



Realiza un barrido continuo con cientos de bandas para un detalle puntual extremo.

Continuidad Espectral
A diferencia de los multiespectrales, los hiperespectrales capturan un espectro casi continuo de luz.

Comparativa de Sensores

Tecnología	Cantidad de Bandas	Aplicación/Ejemplo
Pancromático	1 Banda	Imágenes en B/N de alta resolución 
Multiespectral	Múltiples (Separadas)	Landsat y Sentinel 
Hiperespectral	Cientos (Continuas)	Análisis detallado de firmas espectrales 

15/61

Sensores activos: el análisis estructural

RADAR (Microondas)



Resiliencia Atmosférica

Atraviesa nubes permitiendo la captura de datos en cualquier condición climática.



Operación 24/7

Funciona tanto de día como de noche sin depender de luz solar.



Despliegue Satelital

Se utiliza comúnmente desde plataformas espaciales para monitoreo global.

Tecnología: Microondas
Obstáculos: Atraviesa nubes
Aplicación: Operación día y noche

LiDAR (Láser)



Gran Detalle 3D

Proporciona una representación tridimensional de alta precisión de la superficie.



Dependencia Meteorológica

No atraviesa nubes, requiriendo condiciones despejadas para operar.

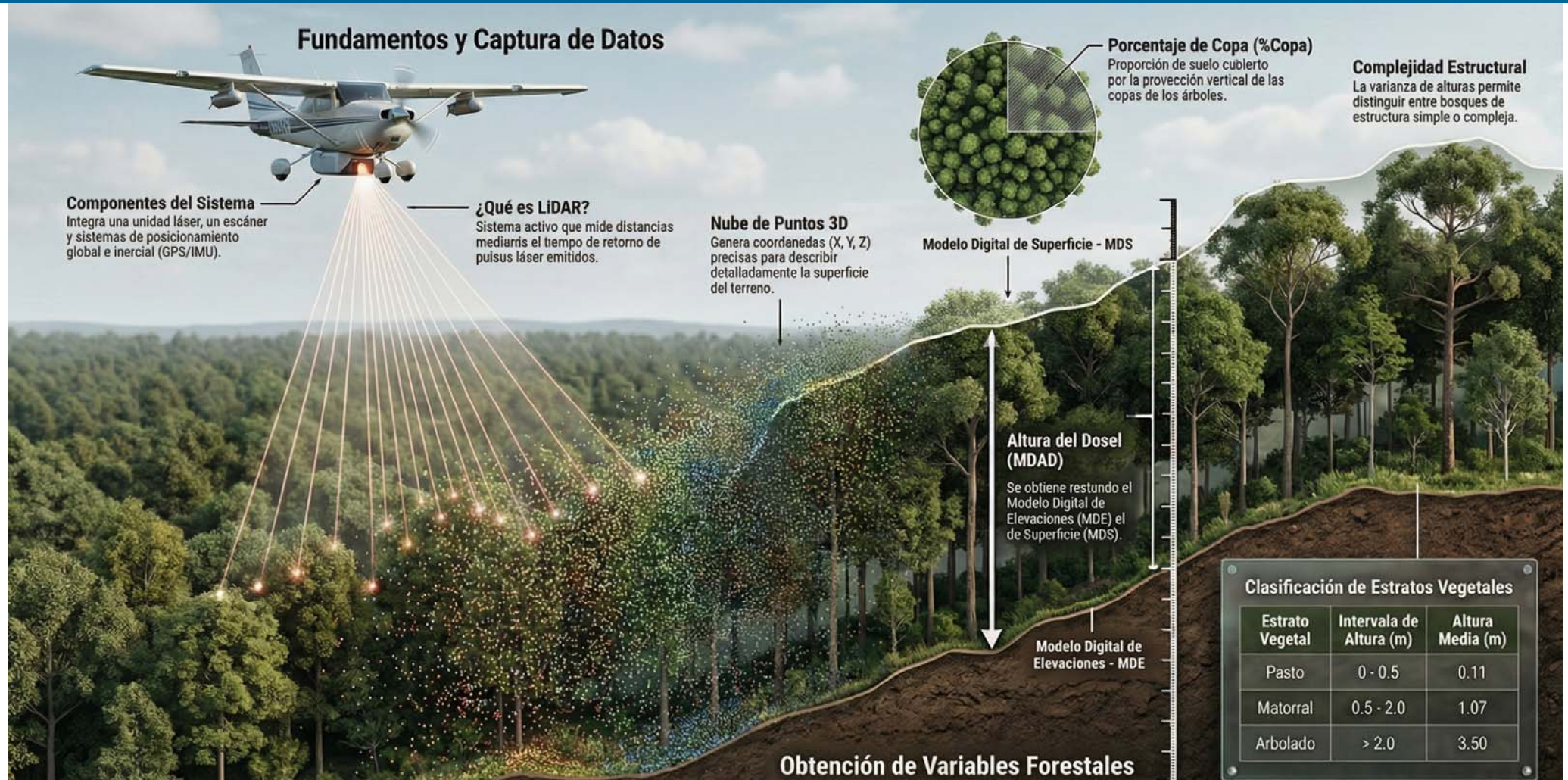


Uso Aerotransportado

Se despliega generalmente en aviones para estudios de terreno detallados.

Tecnología: Láser (Luz)
Obstáculos: No atraviesa nubes
Aplicación: Detalle 3D de alta resolución

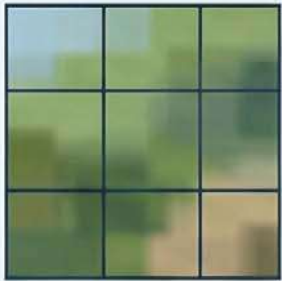
La tecnología LiDAR: revolución del inventario forestal



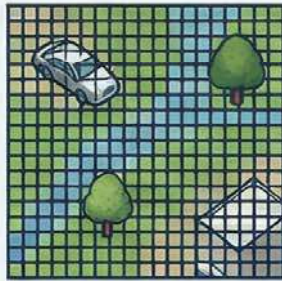
Las tres dimensiones (resoluciones) de la teledetección



Resolución Espacial:
El detalle del píxel



Bajo Detalle:
Satélite Landsat (30m)
Tamaño mínimo de información en el terreno



Alto Detalle:
Drone (<1m)
Determina la escala de trabajo.



Resolución Espectral:
Capacidad de discriminación



Multiespectral

Número y anchura de las bandas que el sensor puede capturar.



Hiperespectral (EnMAP)

Mayor detalle en la firma espectral.

Resolución Temporal



Frecuencia de Adquisición
Periodicidad con la que el sensor vuelve a capturar el mismo punto.



T1



T2, semanas después



T3, meses después



Monitoreo de Cambios en la Superficie
Crucial para estudios que requieren observar la evolución de un terreno en el tiempo.

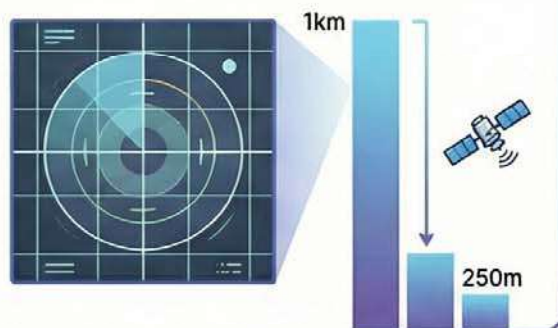
17/61

De la vision global al detalle técnico

Clasificación por Escala de Resolución

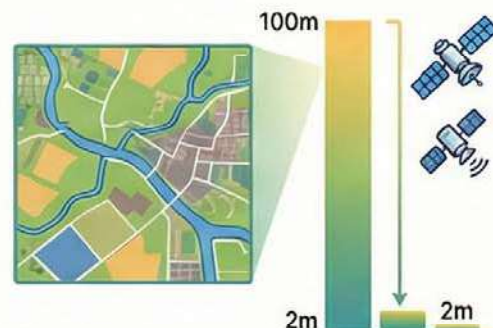
Escala de Reconocimiento: 1km - 250m

Utilizada para visiones globales con sensores como NOAA-AVHRR y TERRA-MODIS.



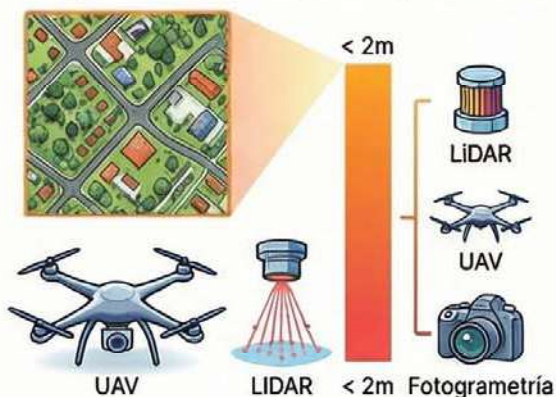
Semidetalle / Detalle 100m - 2m

LANDSAT, SPOT, IKONOS



Escala de Muy Alta Resolución

Lograda mediante LiDAR, UAVs y cámaras fotogramétricas para cartografía de precisión.

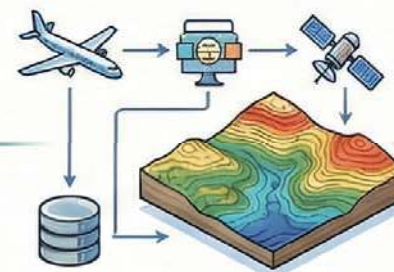


Generación de Cartografía de Precisión



Plataformas Pilotadas a Distancia (UAV)

Permiten la captura de datos con una resolución y flexibilidad superior a los satélites.



Integración PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía)

Uso de LiDAR e imagen para generar modelos digitales del terreno precisos.



Cartografía de muy alta resolución

Generación de productos detallados para el análisis específico del territorio y vegetación.

Aplicaciones de la teledetección: hacia la sanidad forestal

La observación terrestre se divide en aplicaciones de respuesta rápida para emergencias y en el monitoreo estratégico de la salud y composición de los bosques.

Gestión de Emergencias y Respuesta Rápida

Monitoreo de Desastres Naturales



Alta Frecuencia y Tecnología RADAR



Uso de sensores RADAR para permitir la visión nocturna y una vigilancia constante.

Monitoreo y Dinámicas Forestales

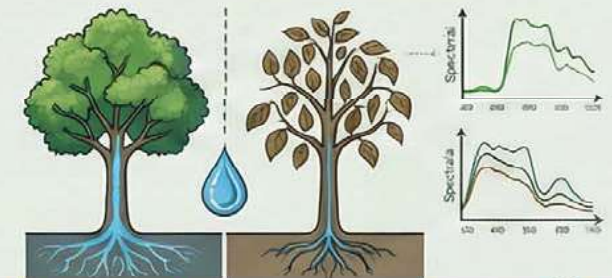
Inventario y Clasificación de Especies

Catalogación técnica para la gestión forestal precisa y el seguimiento de biodiversidad.



Análisis de Estrés Hídrico

Evaluación del estado de salud de la vegetación mediante la detección de falta de agua.



Aplicaciones de la teledetección: hacia la sanidad forestal

Sanidad forestal y teledetección



El triángulo del monitoreo forestal

La Plaga: Ciclo y Comportamiento

Bespoque la plaga diadon tipea del forest beetle.



Análisis del ciclo de vida y los patrones específicos de alimentación del insecto.



El Huésped: Respuesta Fisiológica

Identificación de la especie de árbol y su reacción interna ante el estrés.



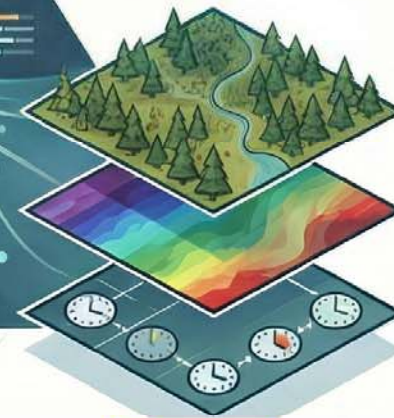
ALINEACIÓN CRÍTICA

Punto de convergencia donde la tecnología captura con precisión el evento biológico.



La Imagen: Resolución Multidimensional

Integración de capacidades espaciales, espectrales y temporales mediante satélites o drones.

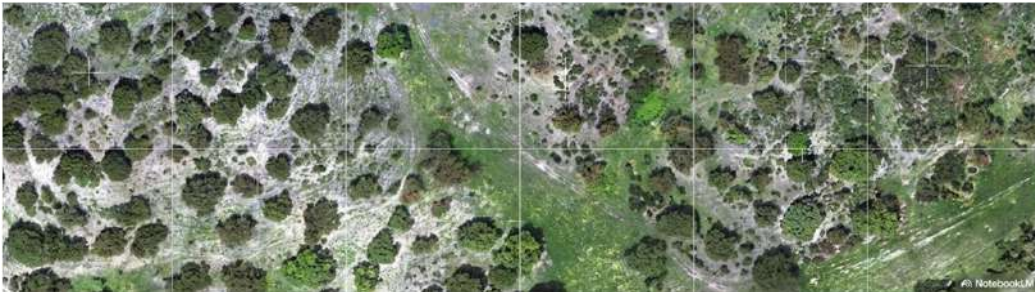
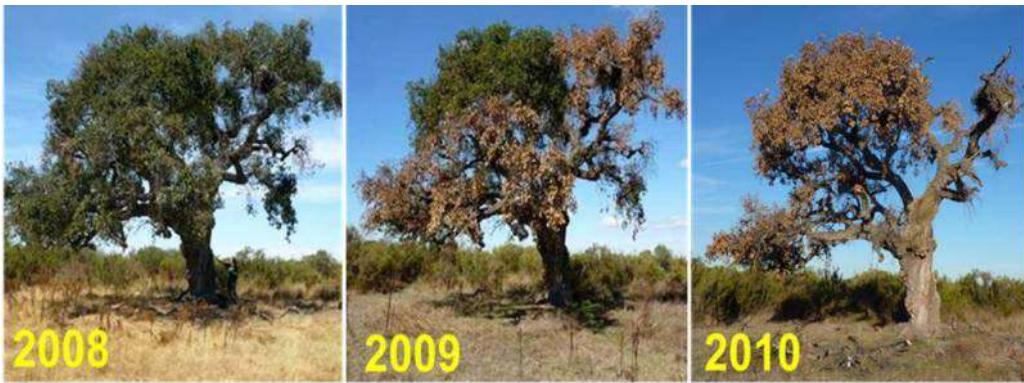


Espacial

Espectral

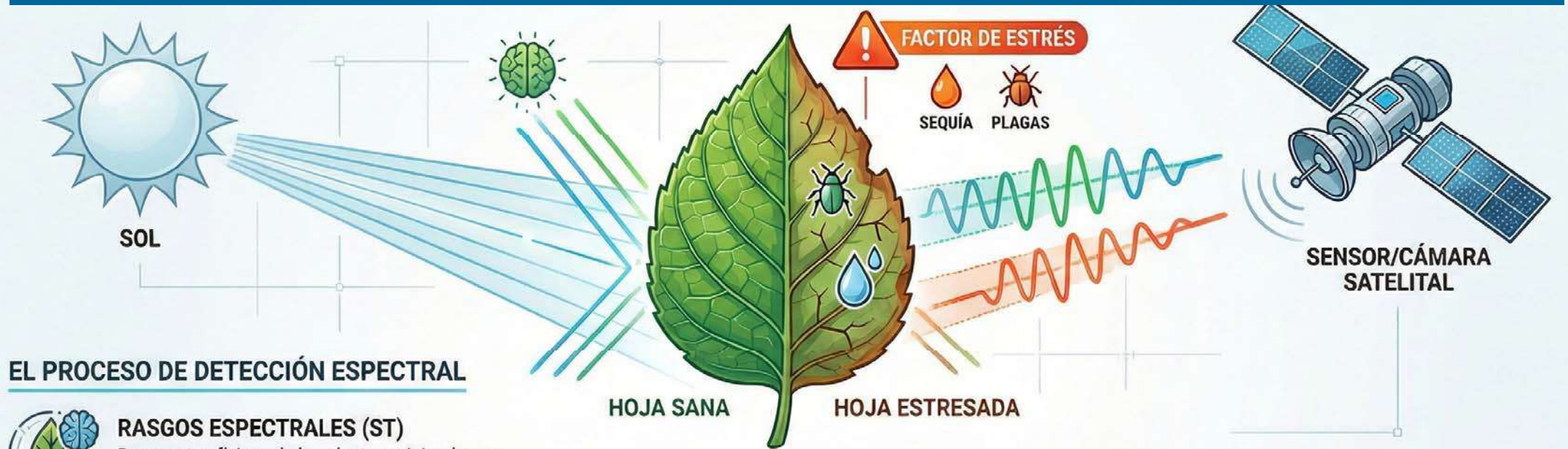
Temporal

El triángulo del monitoreo forestal



Estado de decaimiento	Imagen convencional oblicua	Imagen aérea en color	Imagen aérea en falso color infrarrojo
Asintomático (A)			
Defoliación incipiente (DI)			
Defoliación crónica o puntisechado (P)			
Defoliación avanzada (DA)			

El lenguaje de las plantas: rangos espectrales



EL PROCESO DE DETECCIÓN ESPECTRAL



RASGOS ESPECTRALES (ST)

Respuestas físicas de las plantas originadas por su taxonomía, fenología y filogenética.



ALTERACIÓN DE LA FIRMA ESPECTRAL

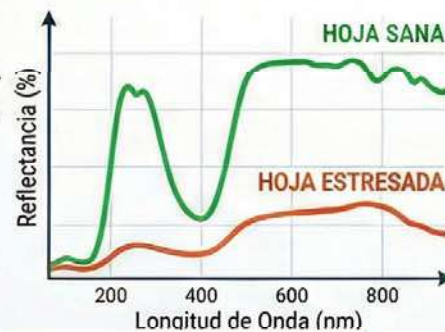
El estrés (sequía o plagas) cambia la bioquímica foliar, modificando la reflectancia detectada.



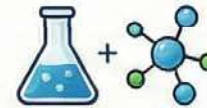
EL OBJETIVO TECNOLÓGICO

Vincular la observación biológica en el sitio con la señal captada por sensores.

COMPARATIVA DE REFLECTANCIA



DIMENSIONES DE LOS RASGOS ESPECTRALES



INDICADORES BIOQUÍMICOS

Análisis de clorofila, nitrógeno, lignina y contenido de agua en la planta.



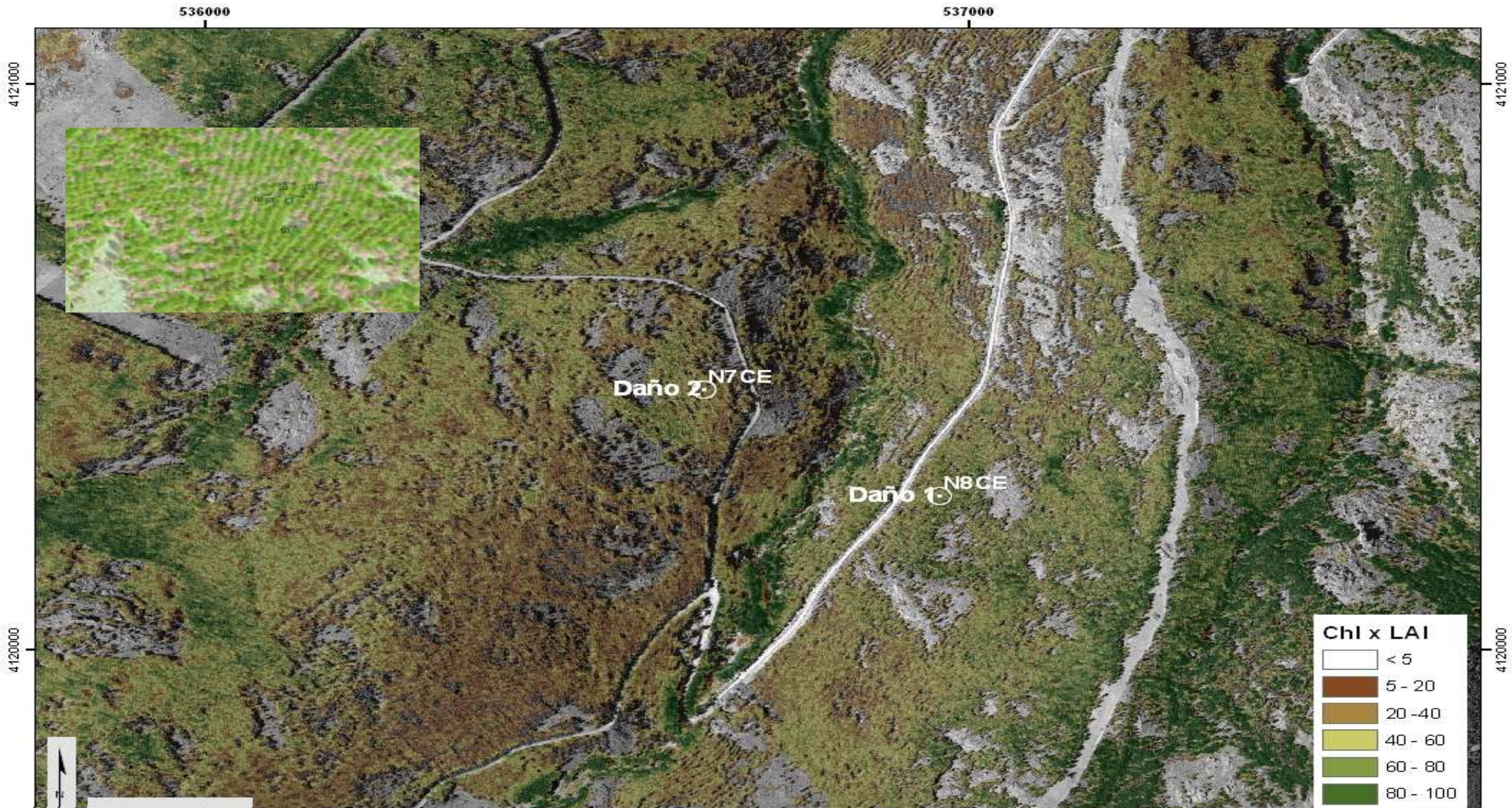
INDICADORES MORFOLÓGICOS

Evaluación del área foliar específica (SLA) y niveles de defoliación.



INDICADORES ESTRUCTURALES

Medición de la altura del árbol, tamaño de copa y densidad de madera.



Metodología de escalado: ¿qué preguntarnos?



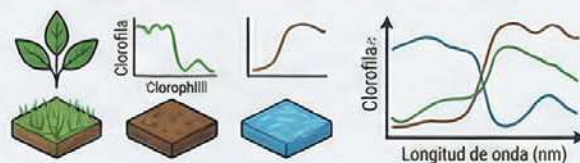
CONSIDERACIONES CRÍTICAS DE SELECCIÓN

RESOLUCIONES ESPACIAL Y TEMPORAL

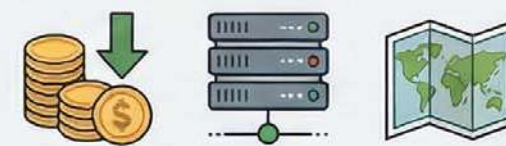


Relación entre el detalle del píxel y la frecuencia de adquisición necesaria.

RELACIÓN FÍSICA Y ESPECTRAL



VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA



Evaluación de costos de acceso, demanda computacional y salidas cartográficas esperadas.

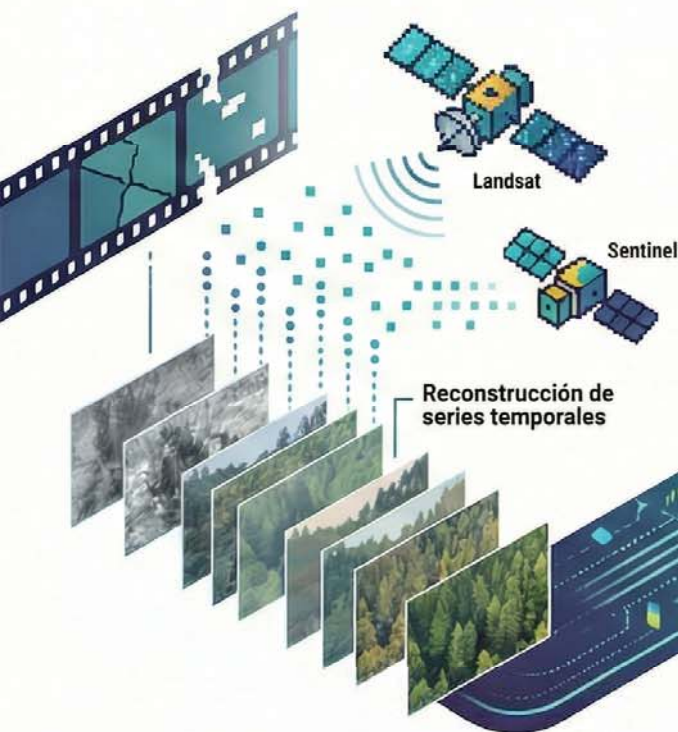
Sanidad forestal y teledetección



Teledetección y Sanidad forestal: de la foto fija a la dinámica

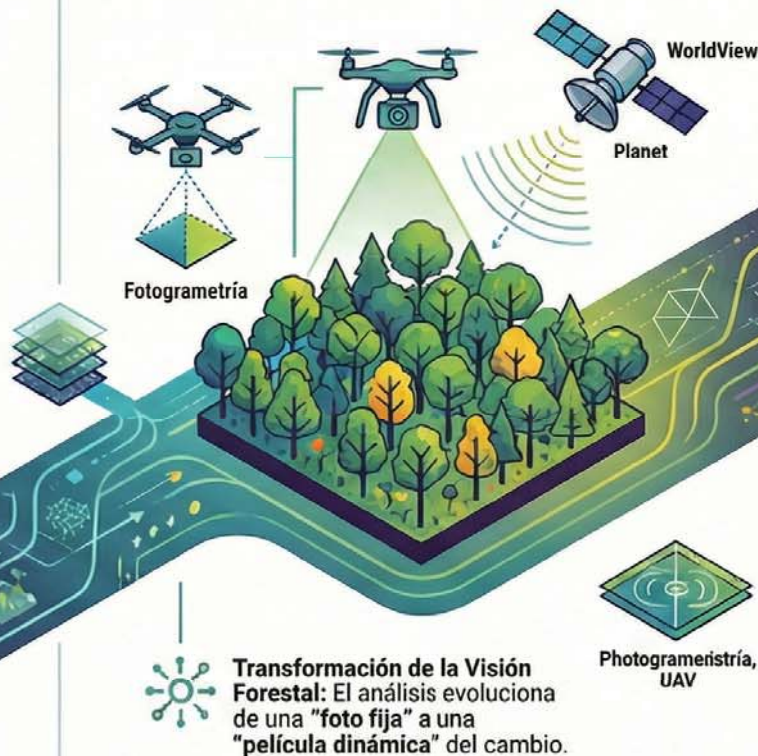
Pasado: Series Temporales de Imágenes

Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.



Presente: Seguimiento y Evaluación Activa

Integración de fotogrametría, UAVs y satélites de alta resolución (WorldView, Planet).



Futuro: Modelado Biofísico y Predictivo

Implementación de Modelos de Transferencia Radiativa para anticipar daños forestales.



Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.



Landsat, Sentinel:
Reconstrucción de series temporales



Fotogrametría,
UAV,
Planet



Objetivo
Seguimiento y evaluación
de alta resolución



Sensores hiperespectrales,
Modelos de
transferencia:

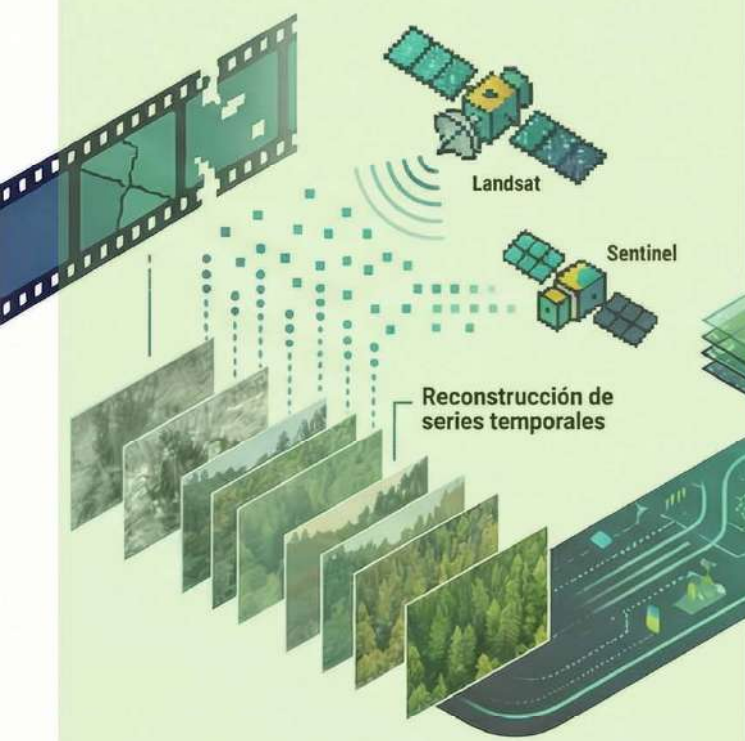


Objetivo
Evaluación previsual
y predicciones

Teledetección y Sanidad forestal: de la foto fija a la dinámica

Pasado: Series Temporales de Imágenes

Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.



Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.

Landsat, Sentinel:
Reconstrucción de series temporales

Presente: Seguimiento y Evaluación Activa

Integración de fotogrametría, UAVs y satélites de alta resolución (WorldView, Planet).



Fotogrametría,
UAV,
Planet

Objetivo
Seguimiento y evaluación
de alta resolución

Futuro: Modelado Biofísico y Predictivo

Implementación de Modelos de Transferencia Radiativa para anticipar daños forestales.



Sensores hiperespectrales,
Modelos de
transferencia:

Objetivo
Evaluación previsual
y predicciones

Evaluación temporal de daños causado por '*Candidatus Phytoplasma pini*' en masas de *P. halepensis* en la S^a de Baza



‘Candidatus *Phytoplasma pini*’: el patógeno y sus síntomas



El Patógeno

Un fitoplasma que coloniza el floema de los pinos, alterando el transporte de agua y nutrientes.



Síntomas Visibles

Proliferación de brotes axilares ('escoba de bruja'), enanismo generalizado, acículas anormales, defoliación severa y eventual muerte de la copa.



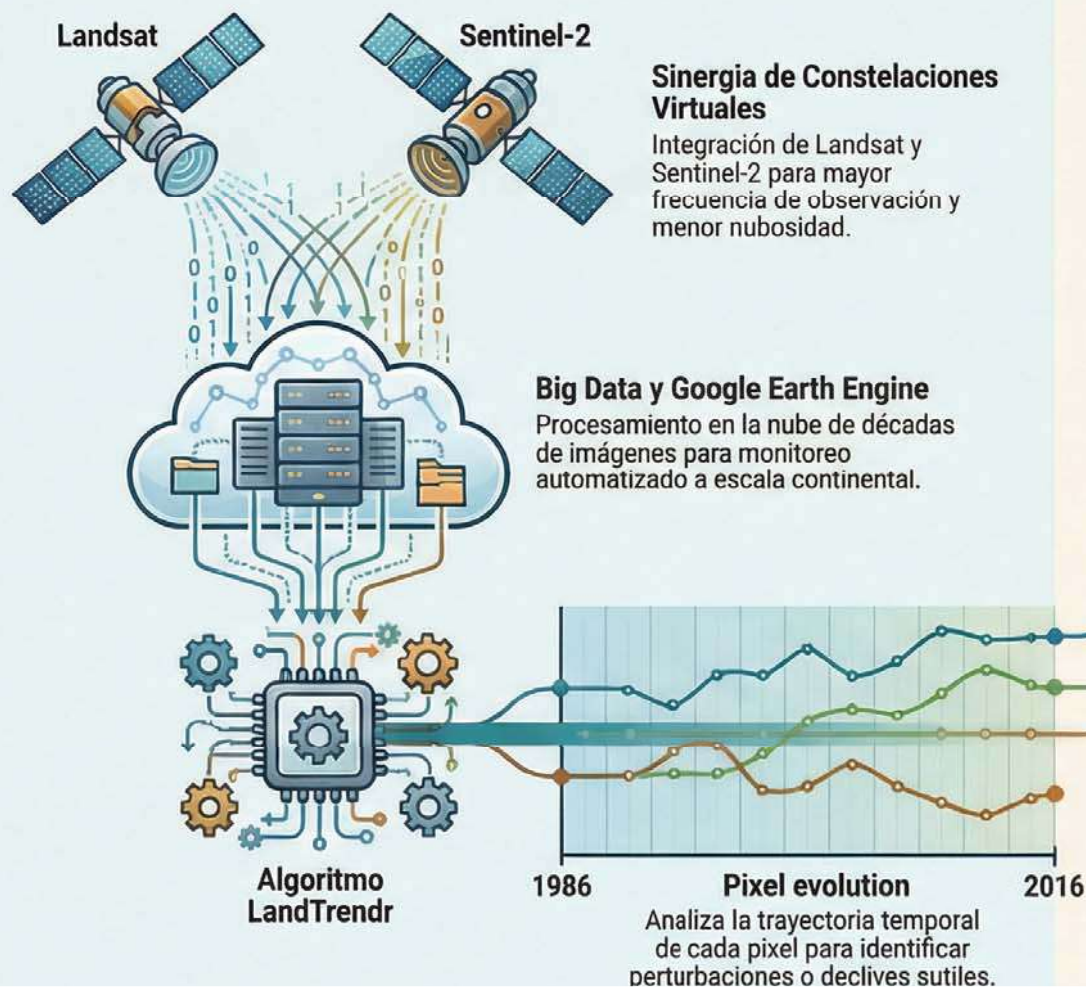
Impacto

Reduce la eficiencia fotosintética y predispone al árbol al colapso, especialmente en escenarios de sequía.

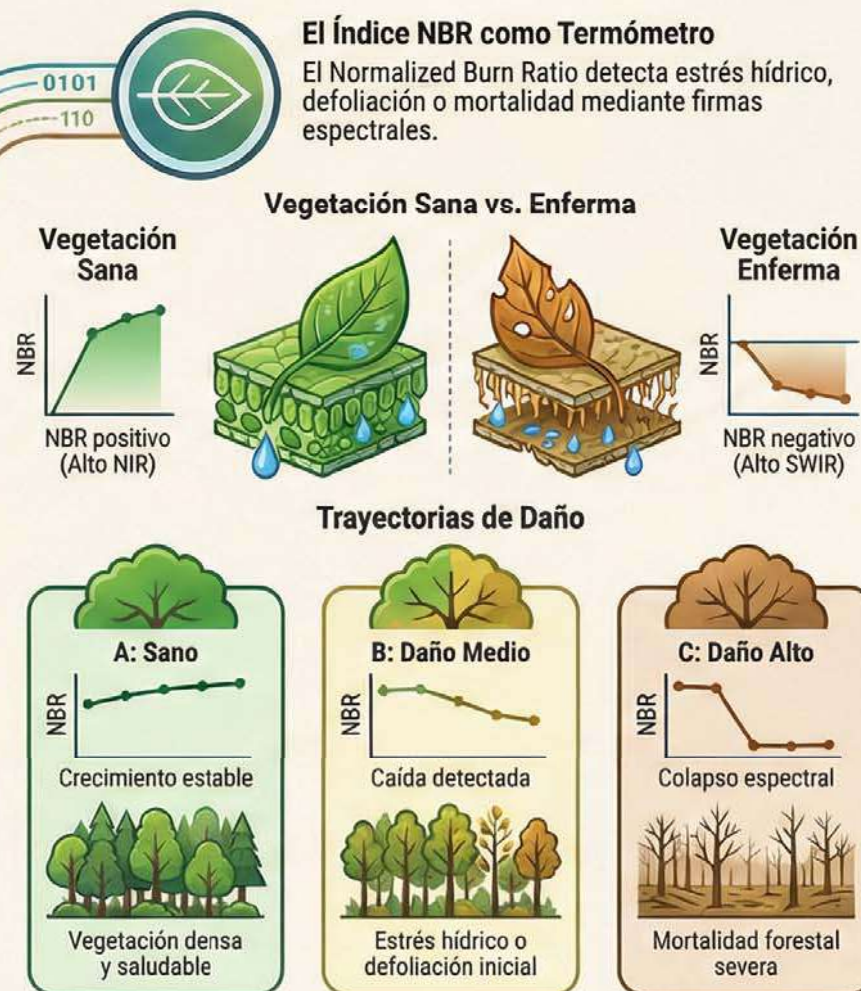
31/61

El diagnóstico: el dato “con botas”

Infraestructura y Análisis de Datos



Diagnóstico y Salud de la Vegetación



El diagnóstico: impacto y factores de estrés ambiental

La relación técnica entre el estrés climático, las condiciones del suelo y la vulnerabilidad de los bosques ante el patógeno *Candidatus Phytoplasma pini*.

Factores Ambientales: Los Detonantes del Colapso



La sequía como factor crítico

El déficit de precipitación anual es el principal motor que debilita la resistencia del árbol.



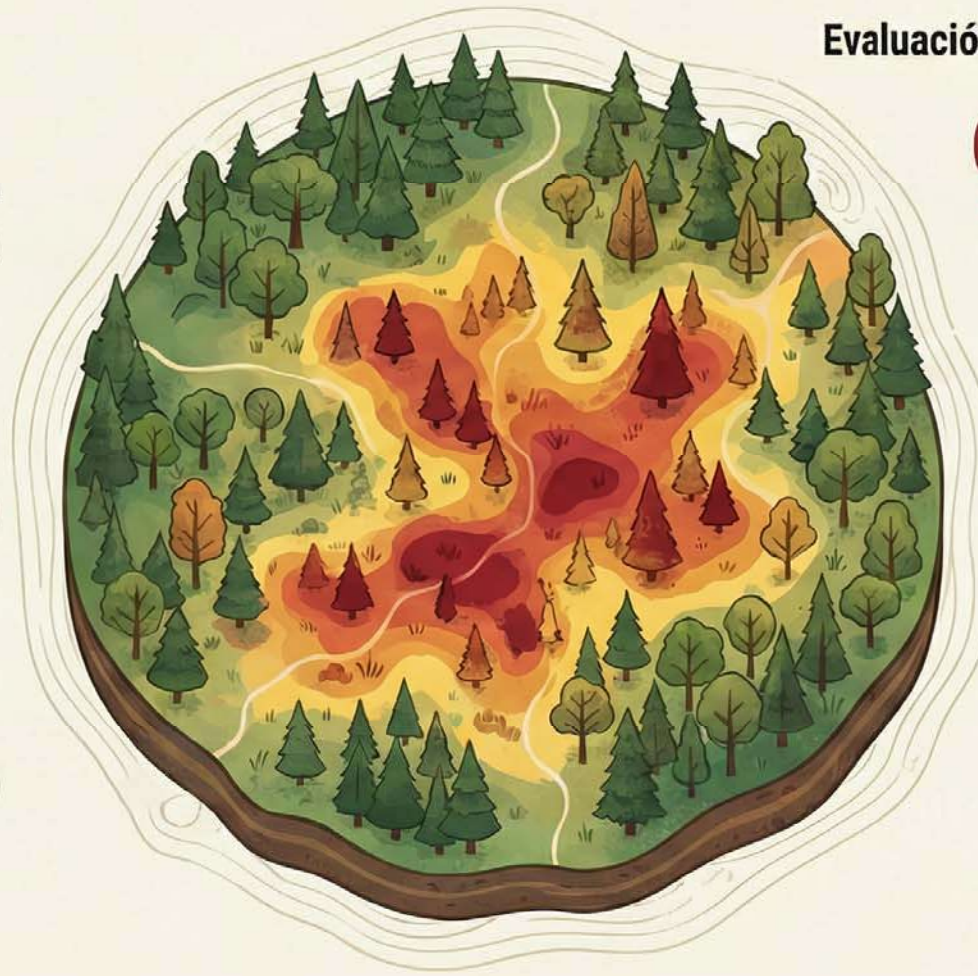
Estrés térmico y químico

Temperaturas elevadas y suelos superficiales con baja saturación de bases actúan como culpables ocultos.



Sinergia del patógeno

El estrés climático y las condiciones pobres del suelo detonan la vulnerabilidad ante el fitoplasma.



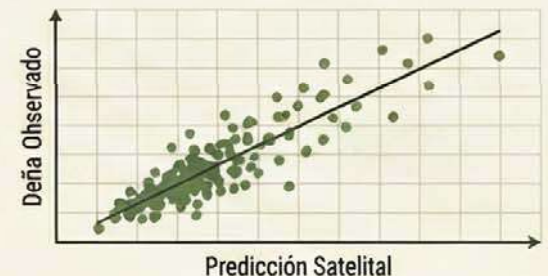
Evaluación de Riesgo y Precisión del Modelo

97% de afectación total
Casi la totalidad del área de estudio muestra algún nivel de impacto por el patógeno.

Distribución de riesgo predominante

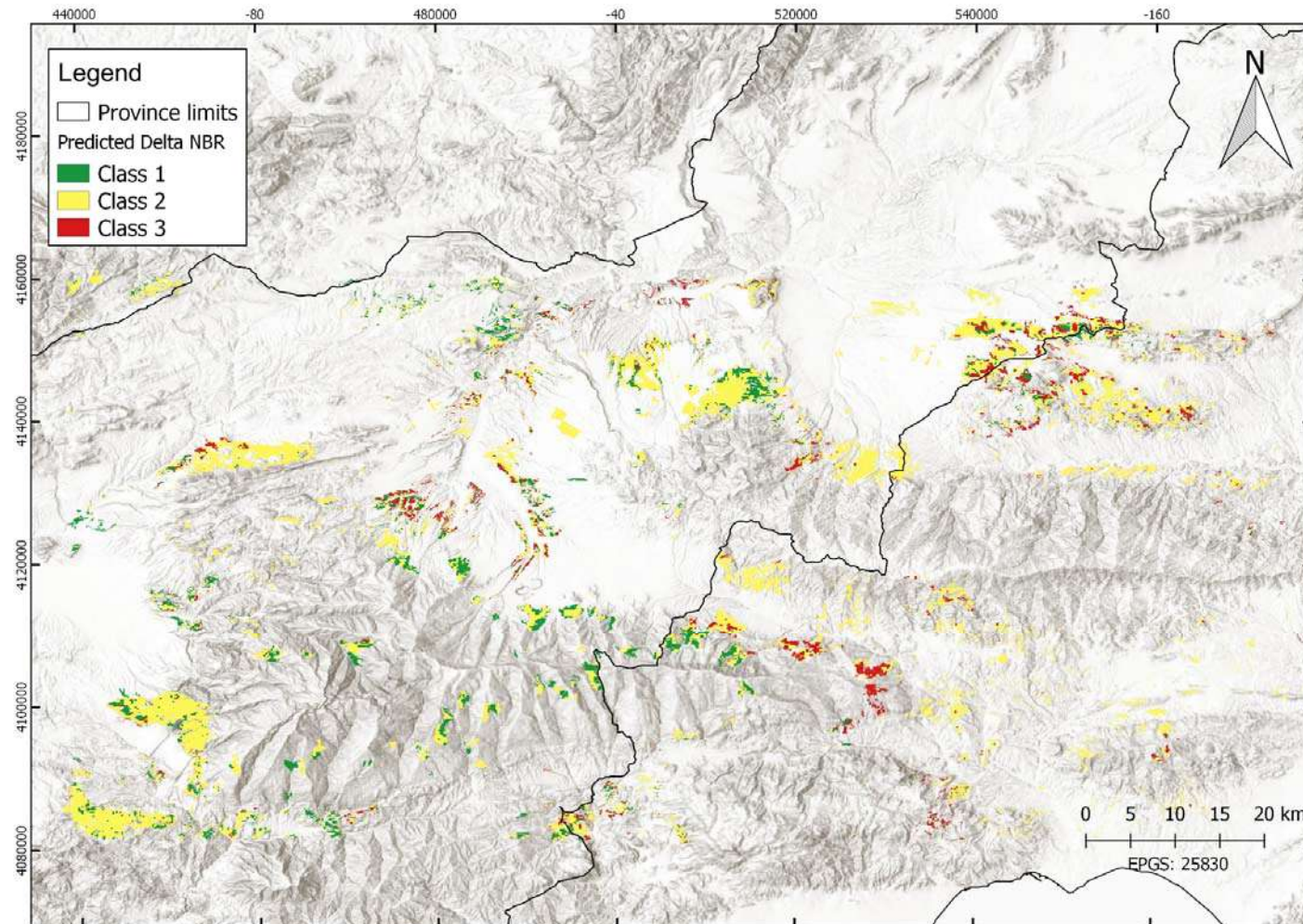


Fiabilidad del modelo k-NN

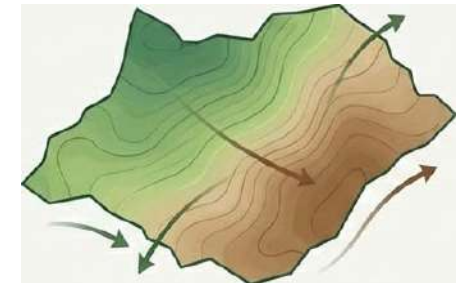


Existe una correlación positiva sólida ($R=0.56$) entre la predicción satelital y el daño observado.

El diagnóstico: la cartografía

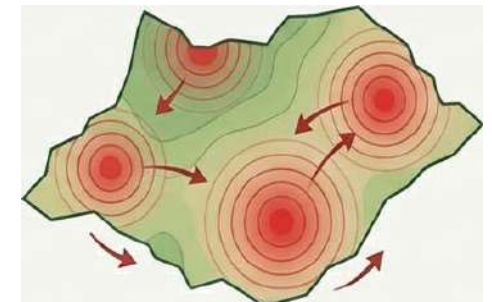


Patrón abiótico (Sequía)



Patrones difusos, afecta grandes áreas,
correlación topográfica

Patrón Biótico (Plagas)



Focos de expansión, patrones de
contagio.

El diagnóstico: sanidad y selvicultura

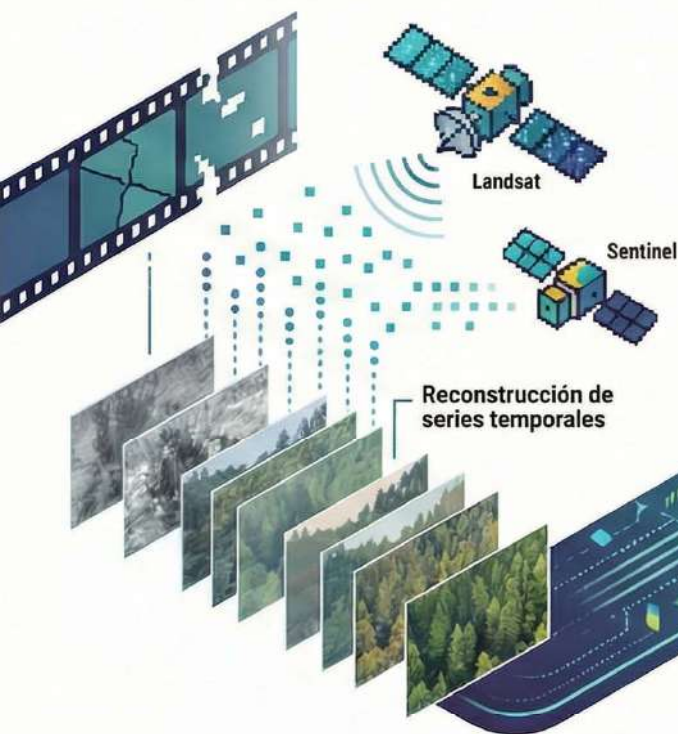


Fotos: Javier Navarro

Teledetección y sanidad forestal: de la foto fija a la dinámica

Pasado: Series Temporales de Imágenes

Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.

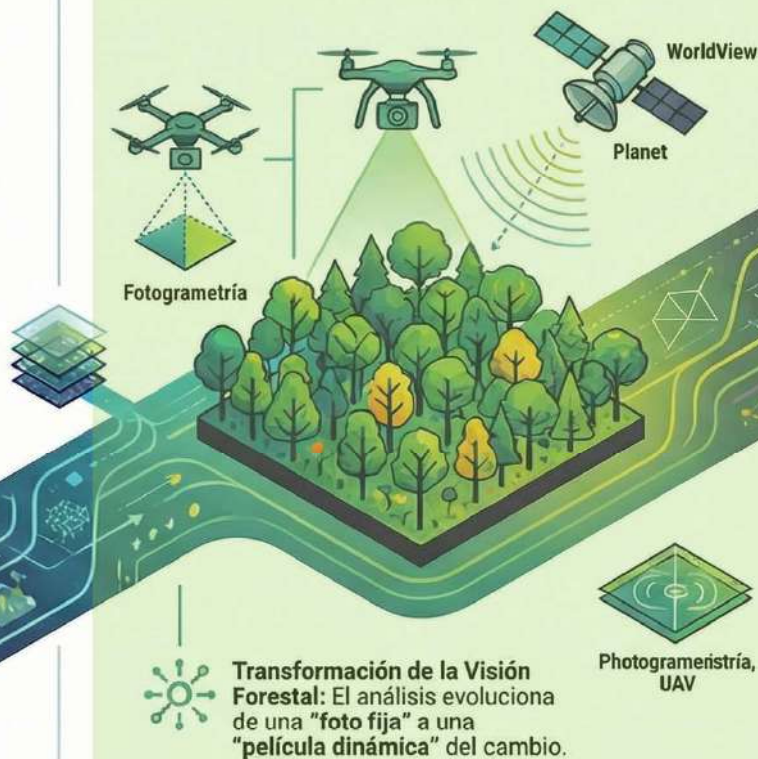


Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.

Landsat, Sentinel:
Reconstrucción de series temporales

Presente: Seguimiento y Evaluación Activa

Integración de fotogrametría, UAVs y satélites de alta resolución (WorldView, Planet).



Fotogrametría,
UAV,
Planet

Objetivo
Seguimiento y evaluación
de alta resolución

Futuro: Modelado Biofísico y Predictivo

Implementación de Modelos de Transferencia Radiativa para anticipar daños forestales.



Sensores hiperespectrales,
Modelos de
transferencia:

Objetivo
Evaluación previsual
y predicciones

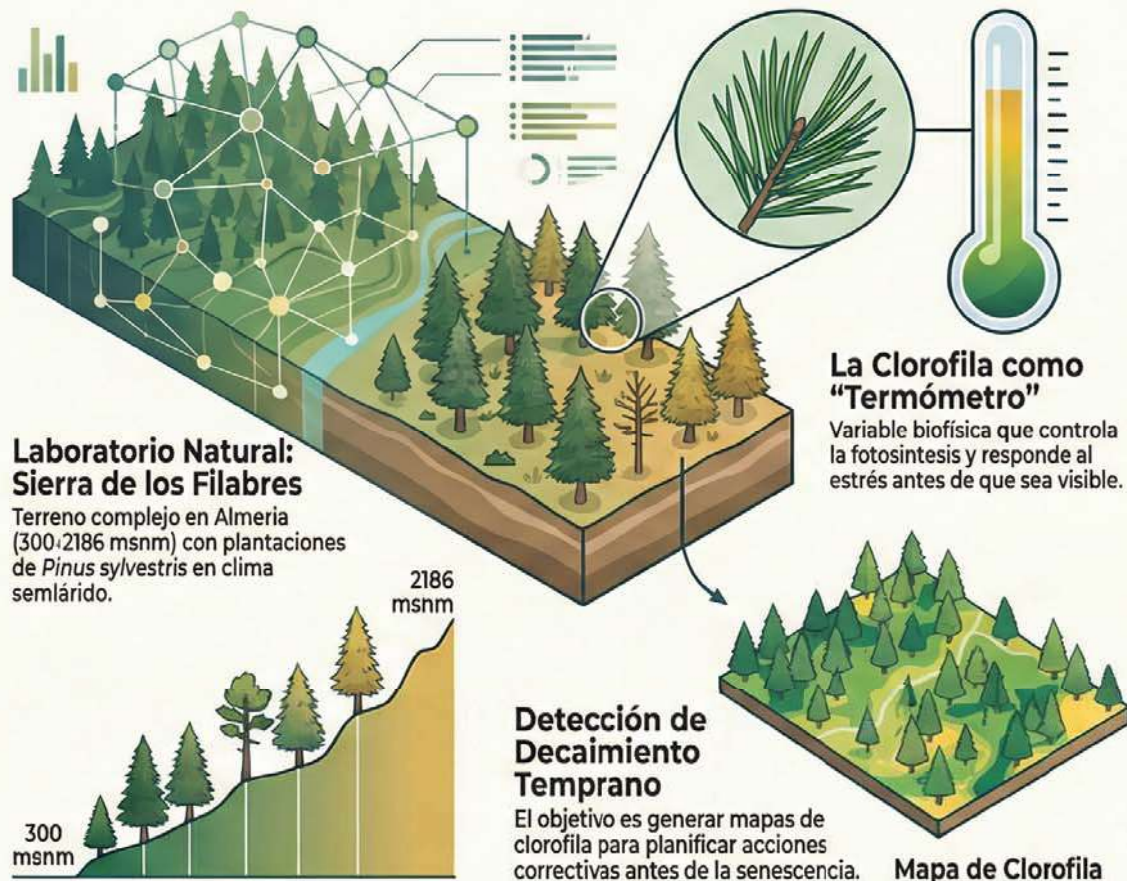
Los decaimientos climáticos: los pinares



37/61

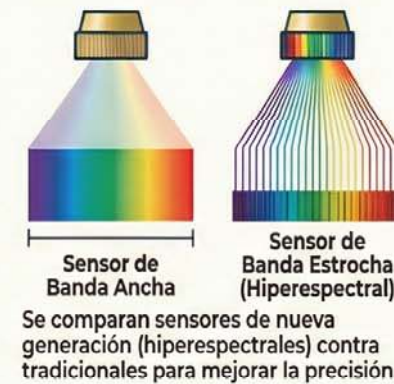
Cartografía de daños: la clorófila el “termómetro” de Filabres

El Escenario y el Indicador Biológico

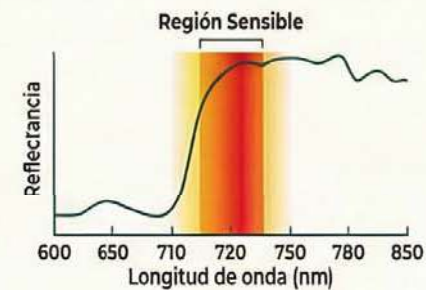


Tecnología de Teledetección y Análisis

Sensores de Banda Estrecha vs. Ancha

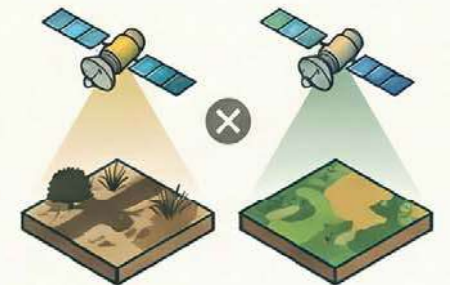


Sensor	Tipo / Plataforma	Resolución
AHS	Aerotransportado (138 bandas)	2 metros
QuickBird	Espacial / Multispectral	2,4 metros
Hyperion / CHRIS	Espacial / Hiperespectral	30 - 34 metros



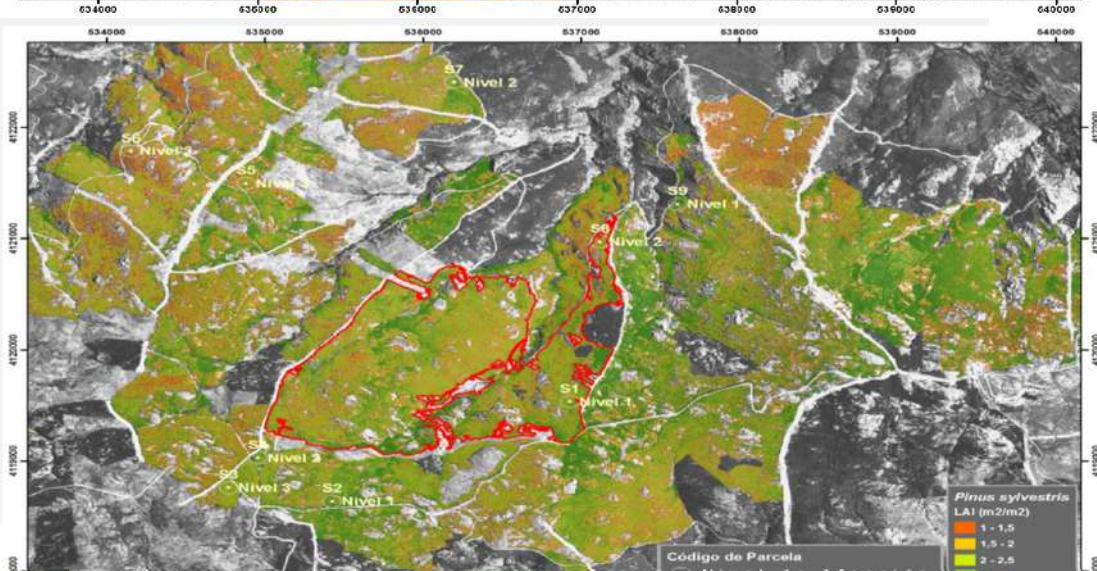
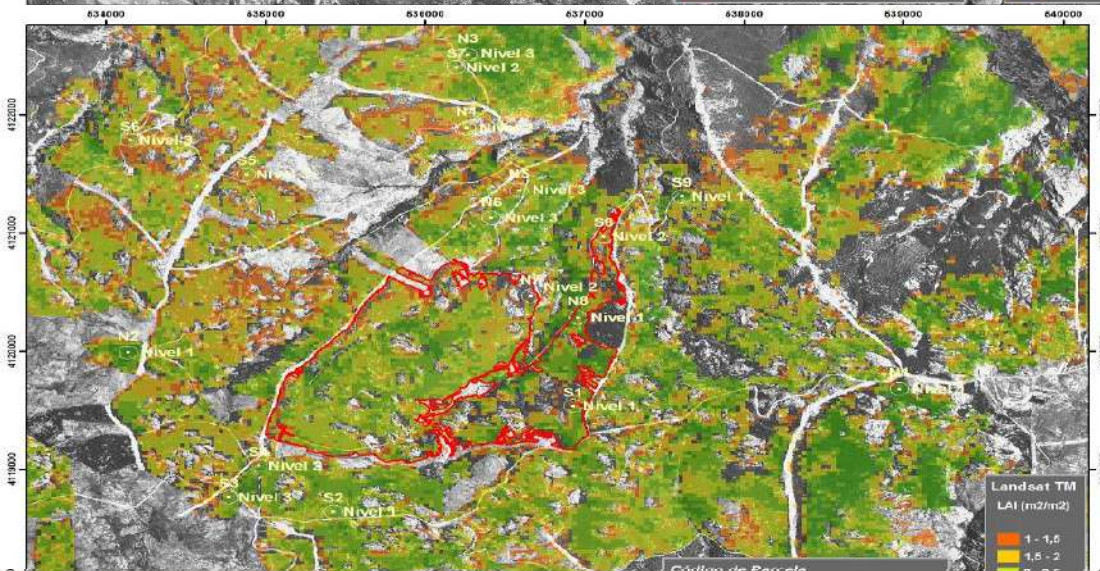
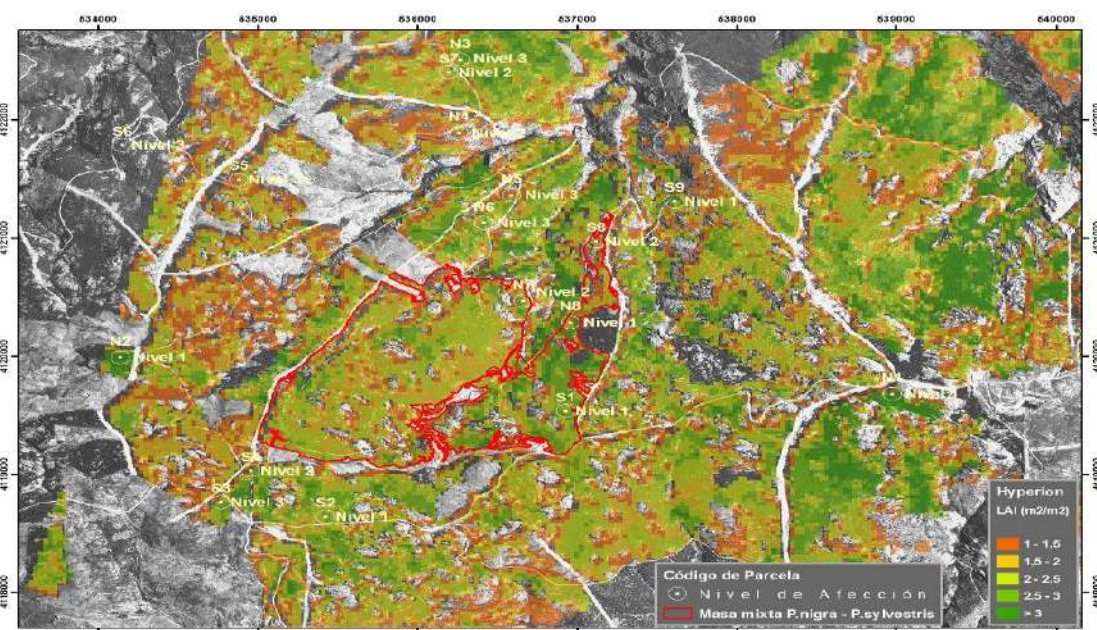
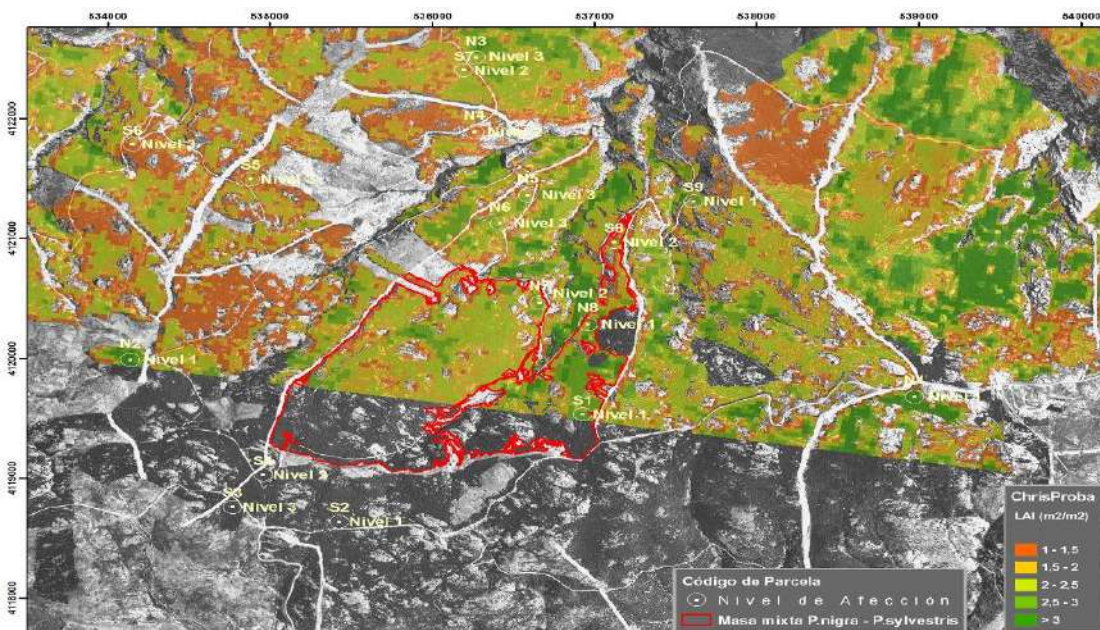
El Índice Red-Edge (710-750nm)

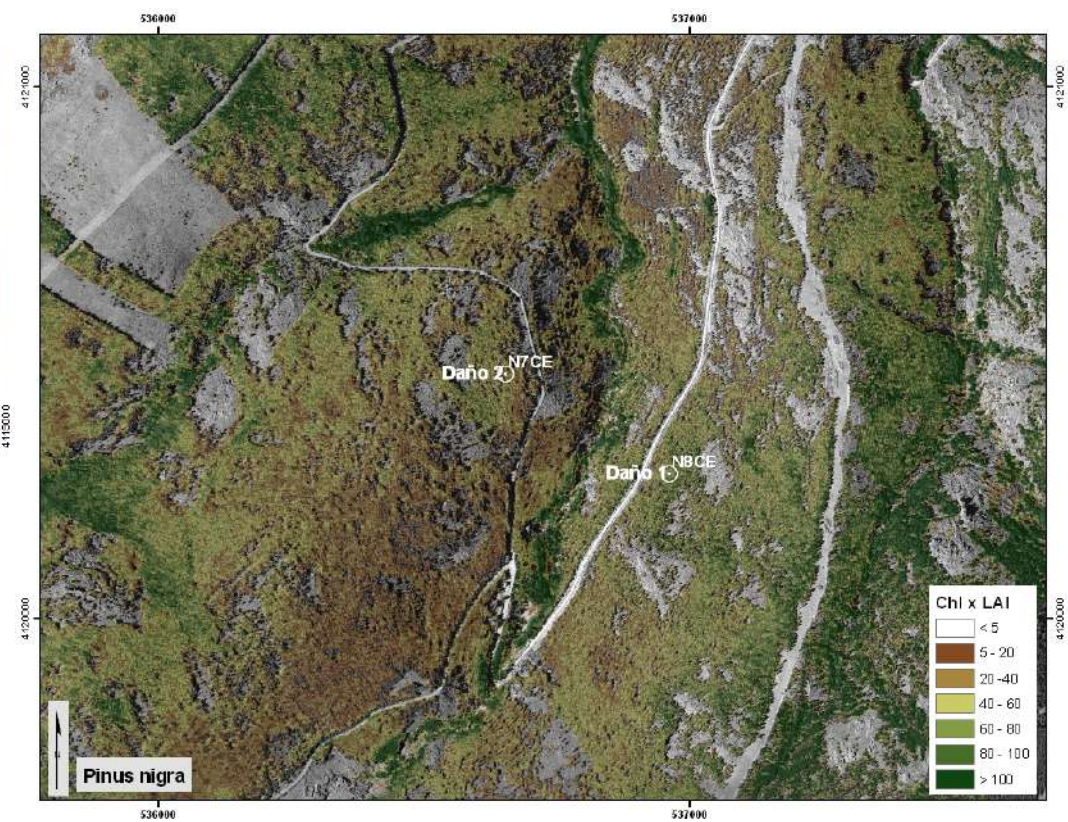
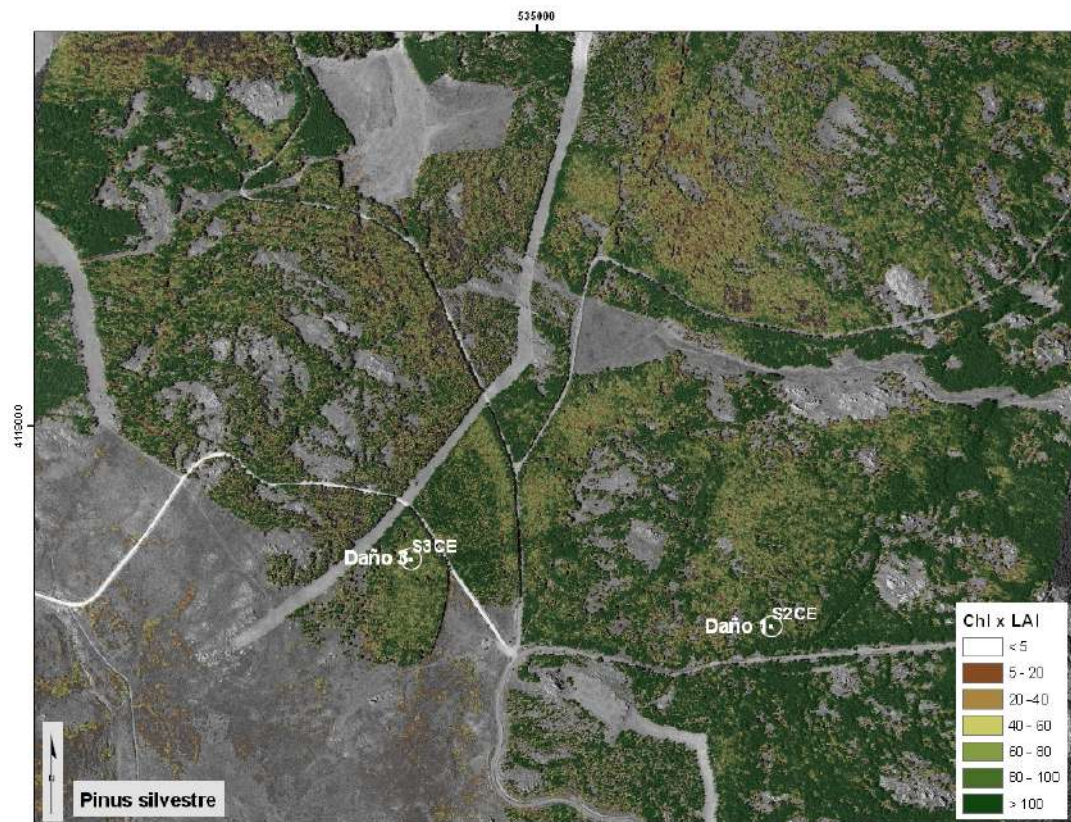
Región del espectro altamente sensible a cambios fisiológicos sutiles en la vegetación.



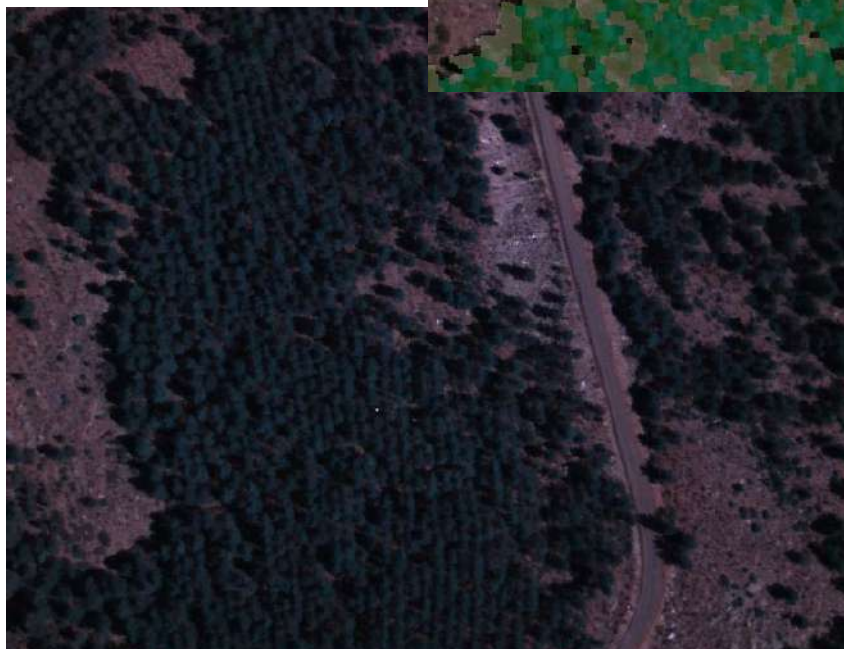
El Reto del Ruido Ambiental

Es crucial minimizar la interferencia visual causada por las sombras y el suelo en el análisis.



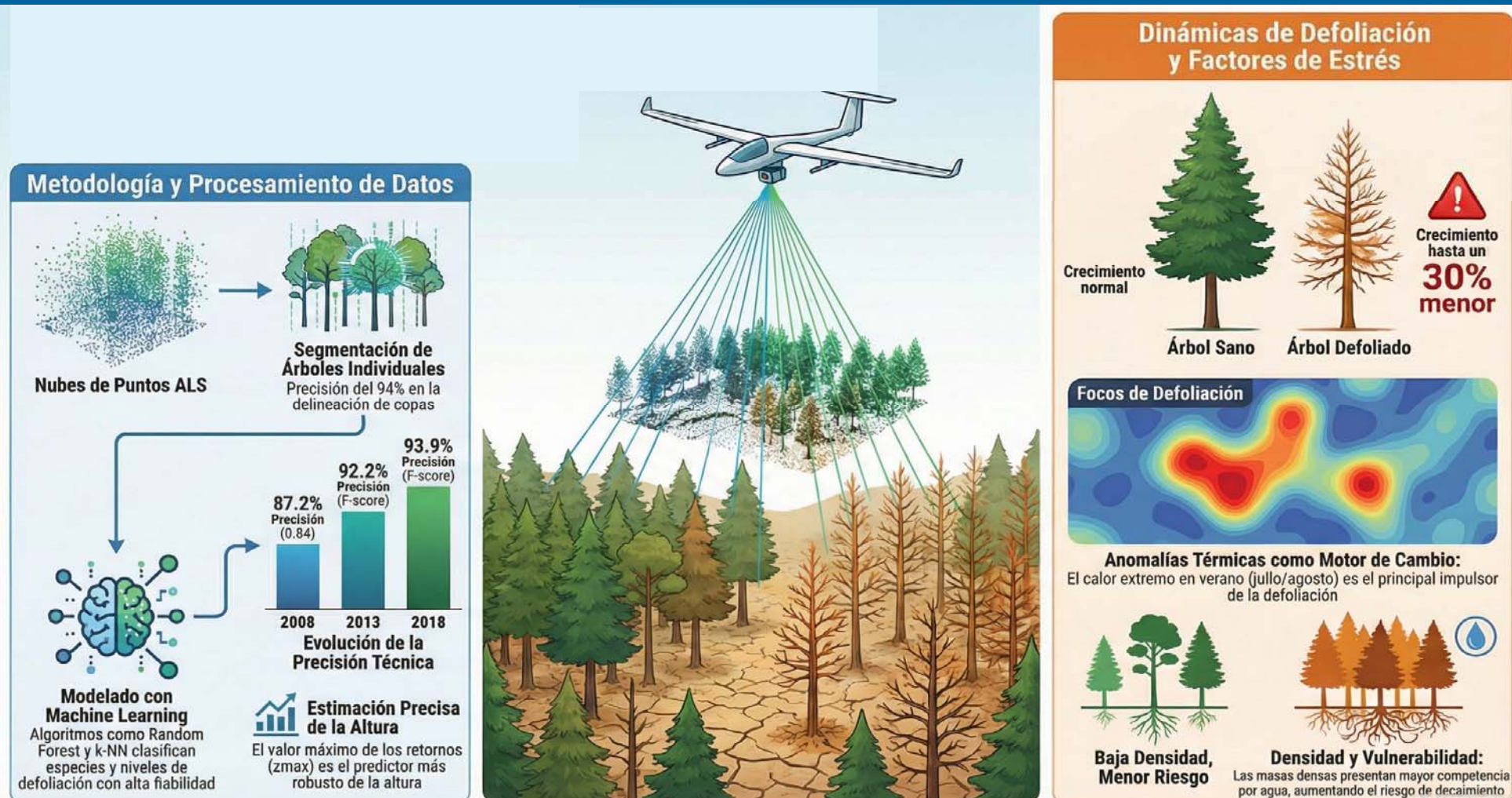


Cartografía de daños: la clorófila el “termómetro” de Filabres

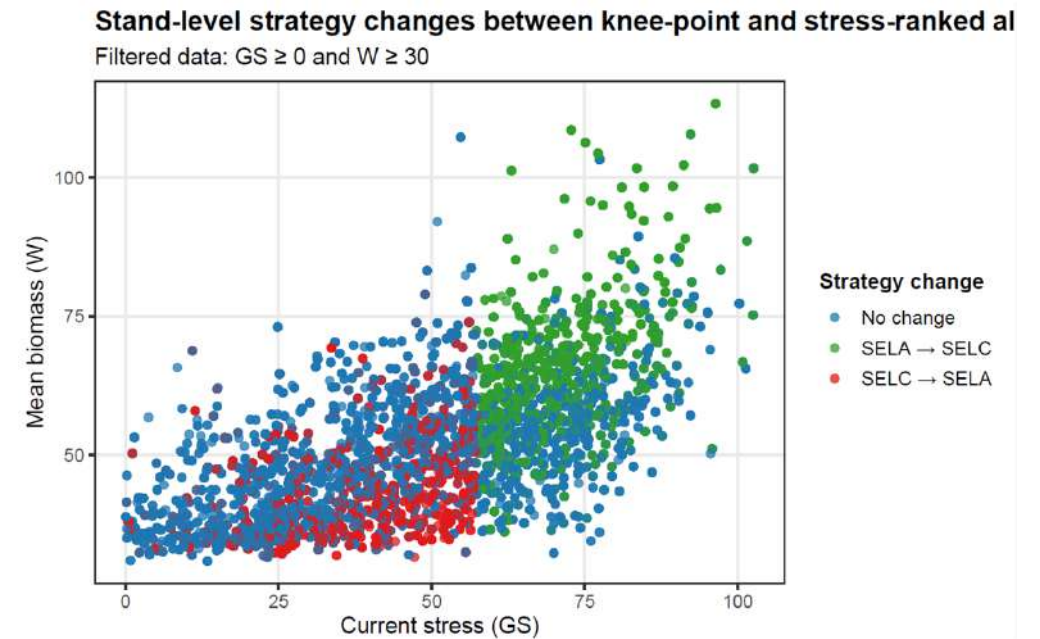
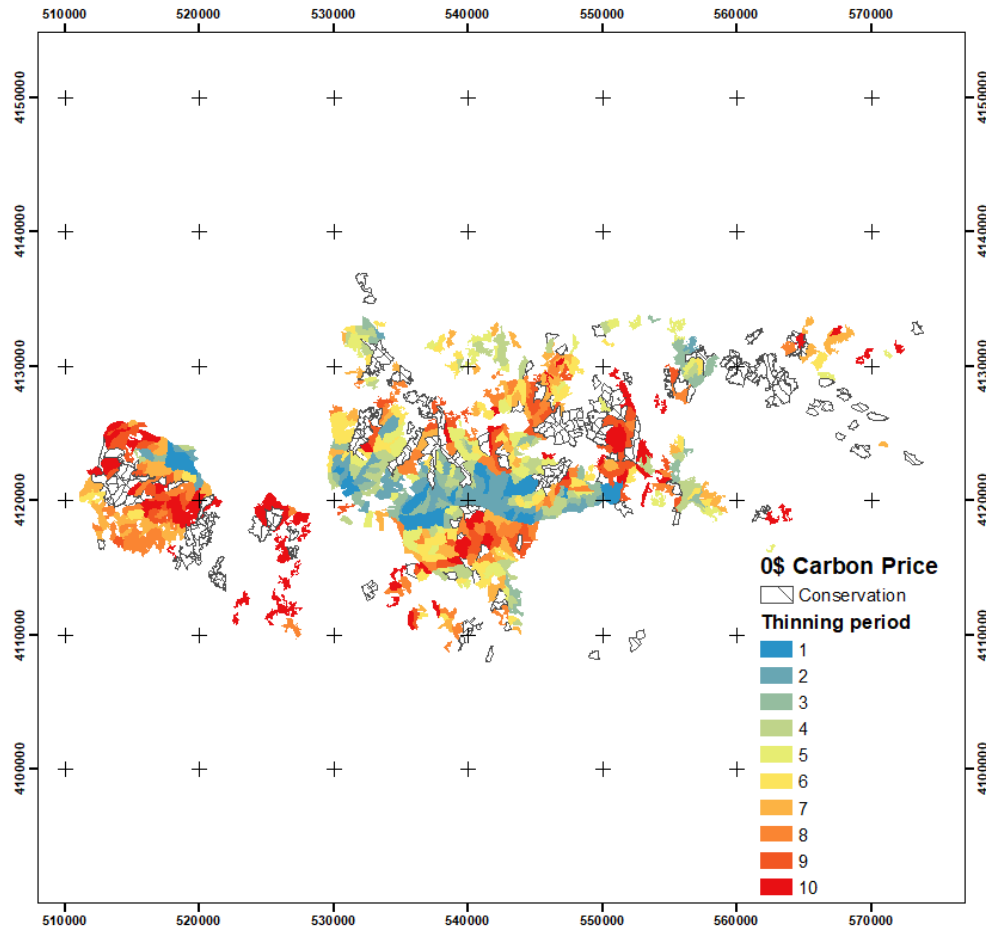


El crecimiento-LiDAR como predictor de áreas críticas

Monitoreo de decaimiento forestal mediante LiDAR-PNOA



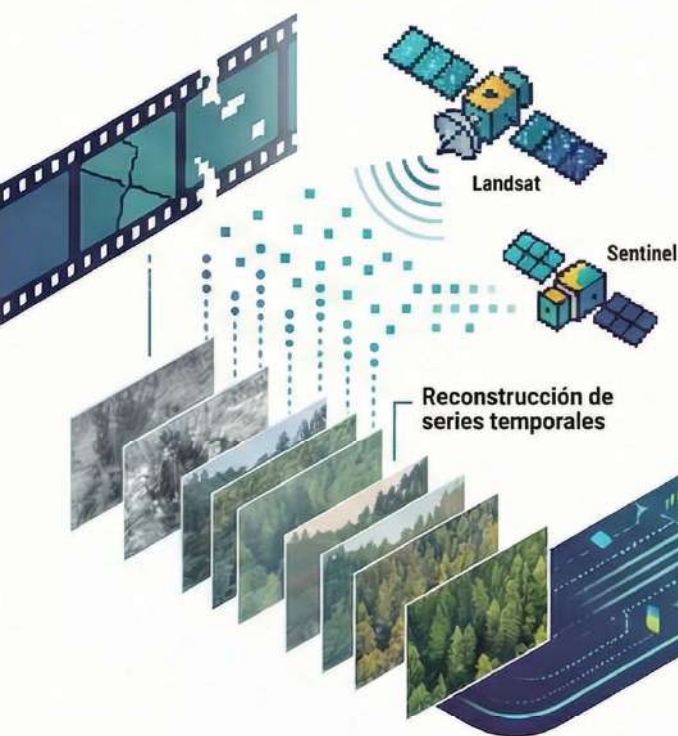
Monitoreo de decaimiento forestal mediante LiDAR-PNOA



Teledetección y Sanidad forestal: de la foto fija a la dinámica

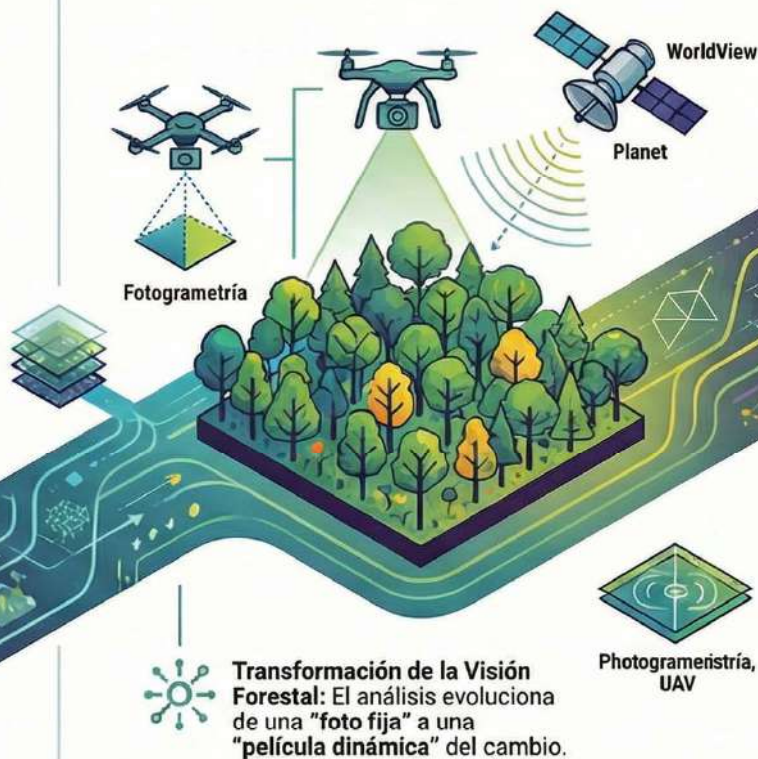
Pasado: Series Temporales de Imágenes

Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.



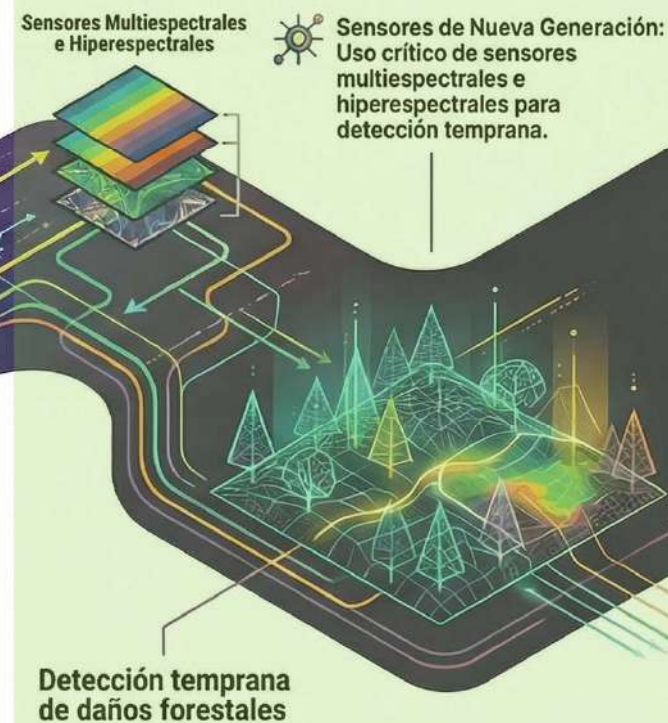
Presente: Seguimiento y Evaluación Activa

Integración de fotogrametría, UAVs y satélites de alta resolución (WorldView, Planet).



Futuro: Modelado Biofísico y Predictivo

Implementación de Modelos de Transferencia Radiativa para anticipar daños forestales.



Uso de datos históricos provenientes de misiones satelitales como Landsat y Sentinel.

Landsat, Sentinel:
Reconstrucción de series temporales

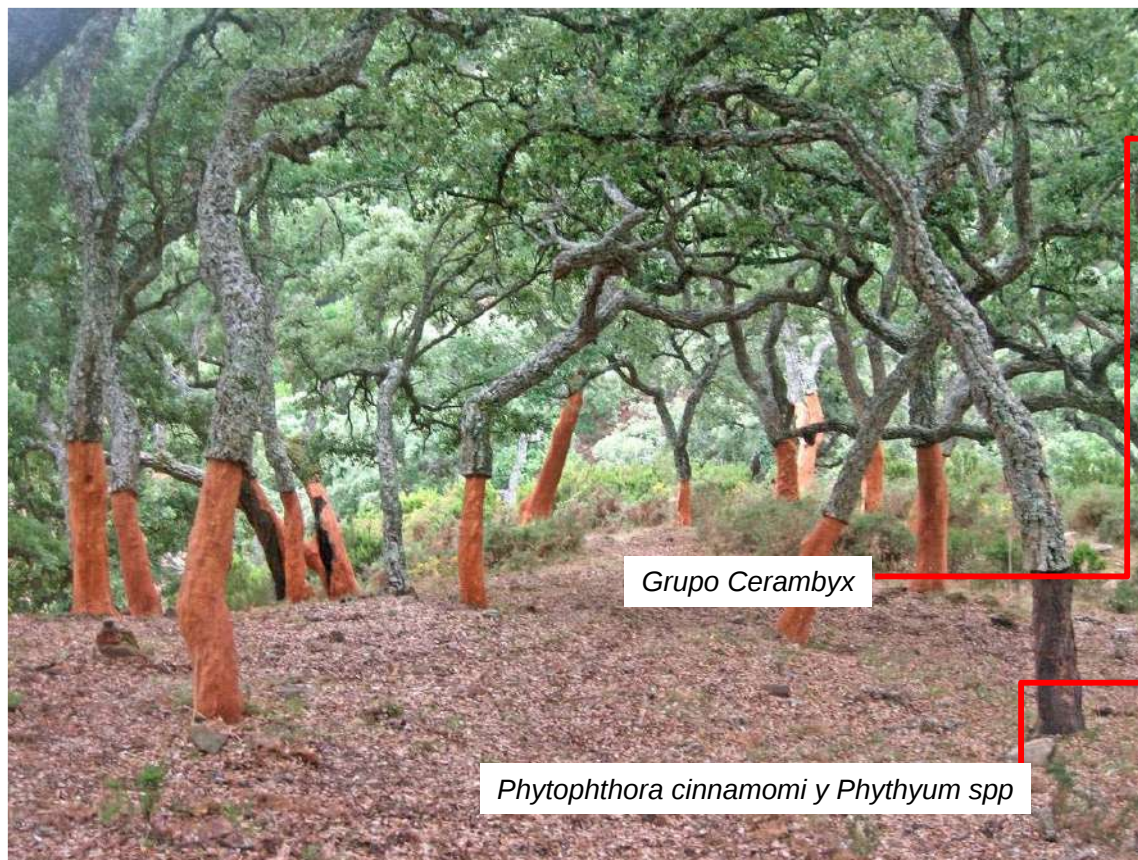
Fotogrametría,
UAV,
Planet

Objetivo
Seguimiento y evaluación
de alta resolución

Sensores hiperespectrales,
Modelos de
transferencia:

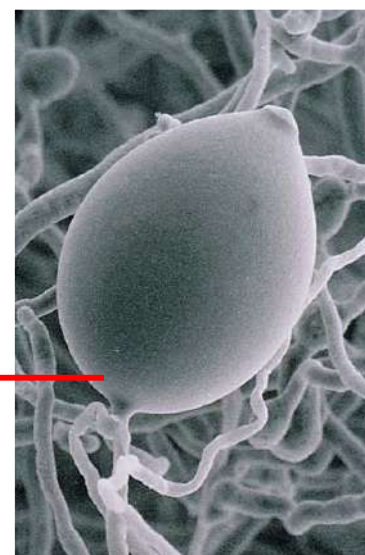
Objetivo
Evaluación previsual
y predicciones

La sanidad de los *Quercus*



Grupo Cerambyx

Phytophthora cinnamomi y *Phythyum* spp



- *Phytophthora cinnamomi*
- *Botryosphaeria corticola*
- Grupo “Cerambyx” sp.
- *Coroebus undatus*
- *Lymantria dispar* / *Tortrix viridana*



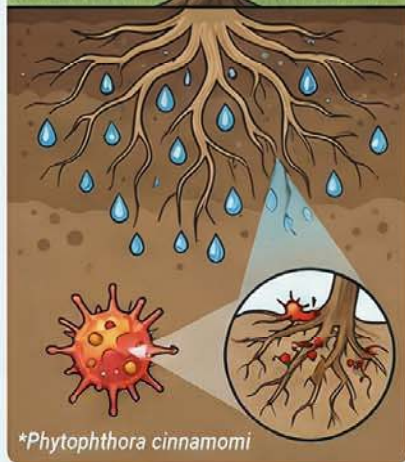
46/61

Diagnóstico de precisión: detección temprana de la *seca* mediante drones

EL DESAFÍO DE LA AMENAZA INVISIBLE



Limitación del Monitoreo Visual.
La evaluación visual detecta el daño cuando el tratamiento preventivo es imposible.

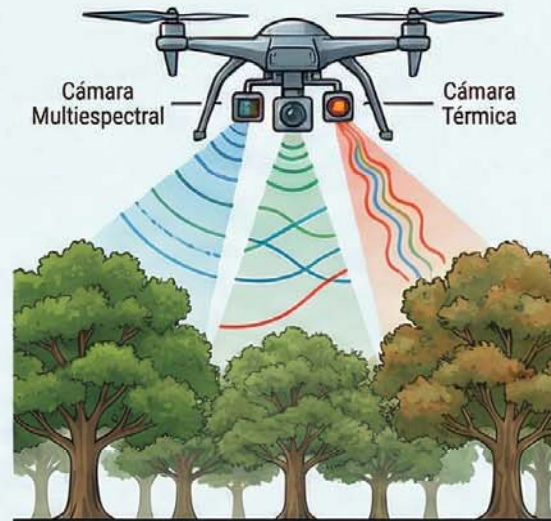


El Mecanismo de la Enfermedad.
El patógeno destruye raíces impidiendo la toma de agua antes de la defoliación.

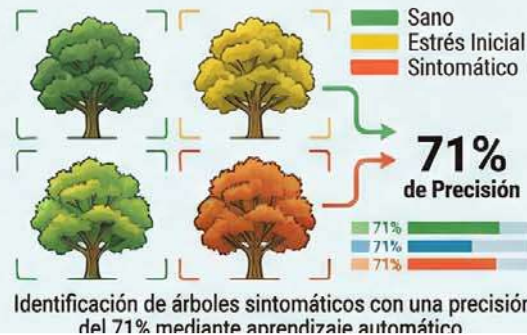


Limitación del Monitoreo Visual
La evaluación visual detecta el daño cuando el tratamiento preventivo es imposible.

FLUJO DE TRABAJO Y DIAGNÓSTICO TECNOLÓGICO



Clasificación de Precisión (Indices GRVI y NXT)



Fusión de Sensores Multiespectrales y Térmicos



Segmentación de Copas con 95% de Precisión
Algoritmos de delineación aíslan automáticamente cada árbol para un análisis individualizado.



Comparación de Indicadores Fisiológicos y Detección Remota

Indicador Fisiológico	Efecto de la Enfermedad	Método de Detección (UAV)
Tasa de Fotosíntesis	Disminución significativa	Cámara Multiespectral (Pigmentos)
Conductancia Estomática	Cierre de estomas (estrés)	Cámara Térmica (Temperatura)
Clasificación de Salud	Identificación de síntomas	Índices GRVI / NXT

Diagnóstico de precisión: detección temprana de la *seca* mediante drones

Predicción Finca Huerta Ídolos



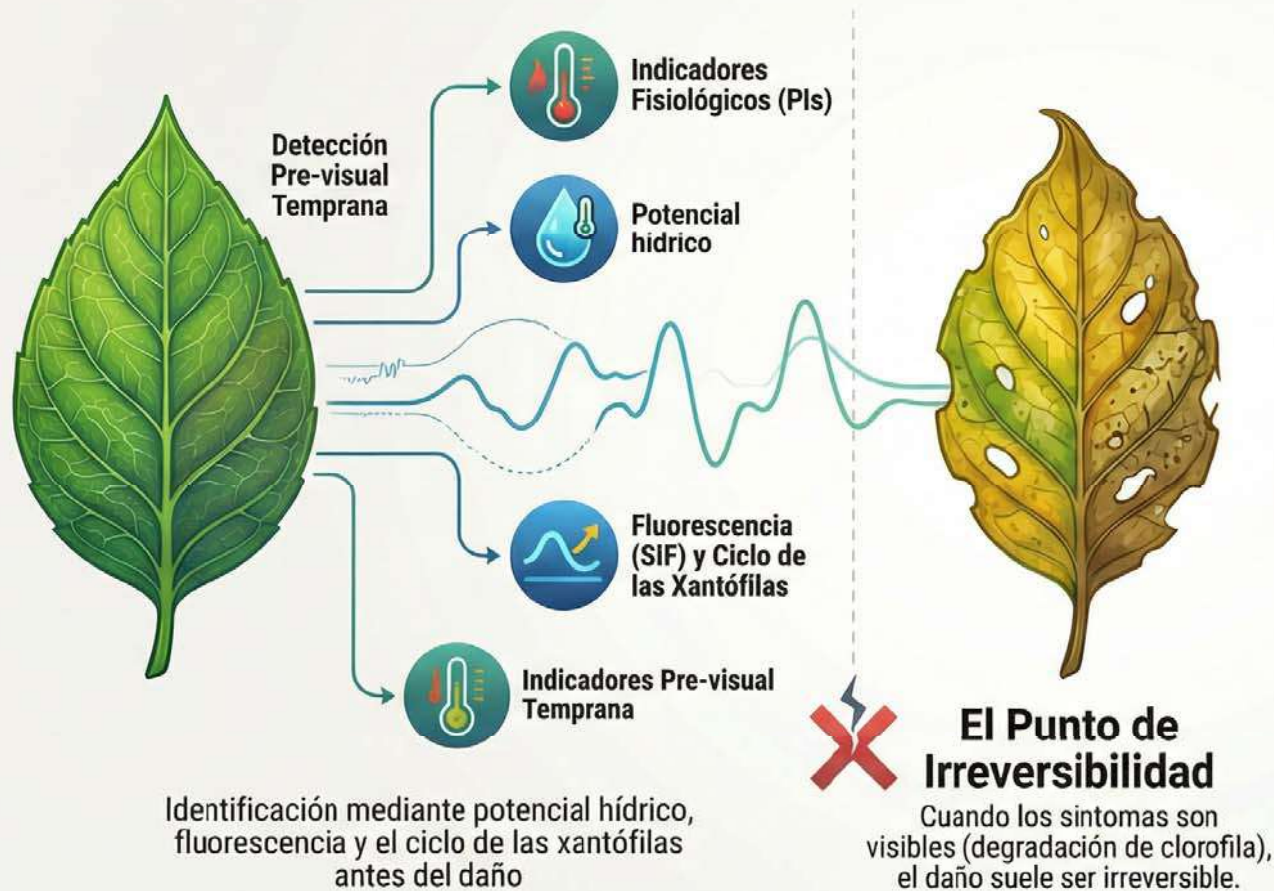
48/61

Sanidad forestal y teledetección



Detección avanzada de procesos de estrés/daños

La Cronología del Estrés: El Imperativo Pre-visual



Evolución del Mapeo y Modelado



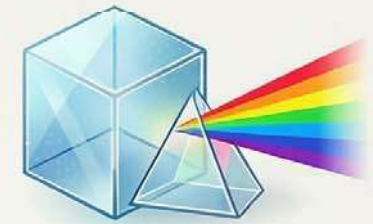
De la "Caja Negra"

Transición de regresiones estadísticas simples



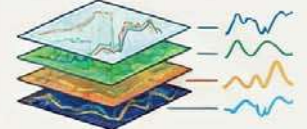
Modelos Empíricos (Viejos)

Metodología: Regresión estadística directa
Alcance: Correlaciones locales observadas
Limitación: Confunde estructura con química



"Caja de Cristal"

a modelos basados en leyes físicas de la luz (RTM)



Modelos Físicos (Nuevos)

Metodología: Lays de transferencia radiativa
Alcance: Comprensión universal y física
Limitación: Alisa la química foliar real

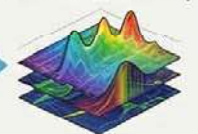
Ciencia Hiperespectral vs. NDVI

NDVI
(Saturación de Biomasa)



vs.

Ciencia Hiperespectral
(Concentración Química Real)



Inversión de Modelos Físicos

Uso de simulaciones físicas para obtener una comprensión

Integración de sensores: hacia un modelo holístico

CAPAS DE DATOS Y VARIABLES CRÍTICAS



Estructura 3D (LiDAR)

Proporciona información precisa sobre la arquitectura física y altura del dosel forestal.



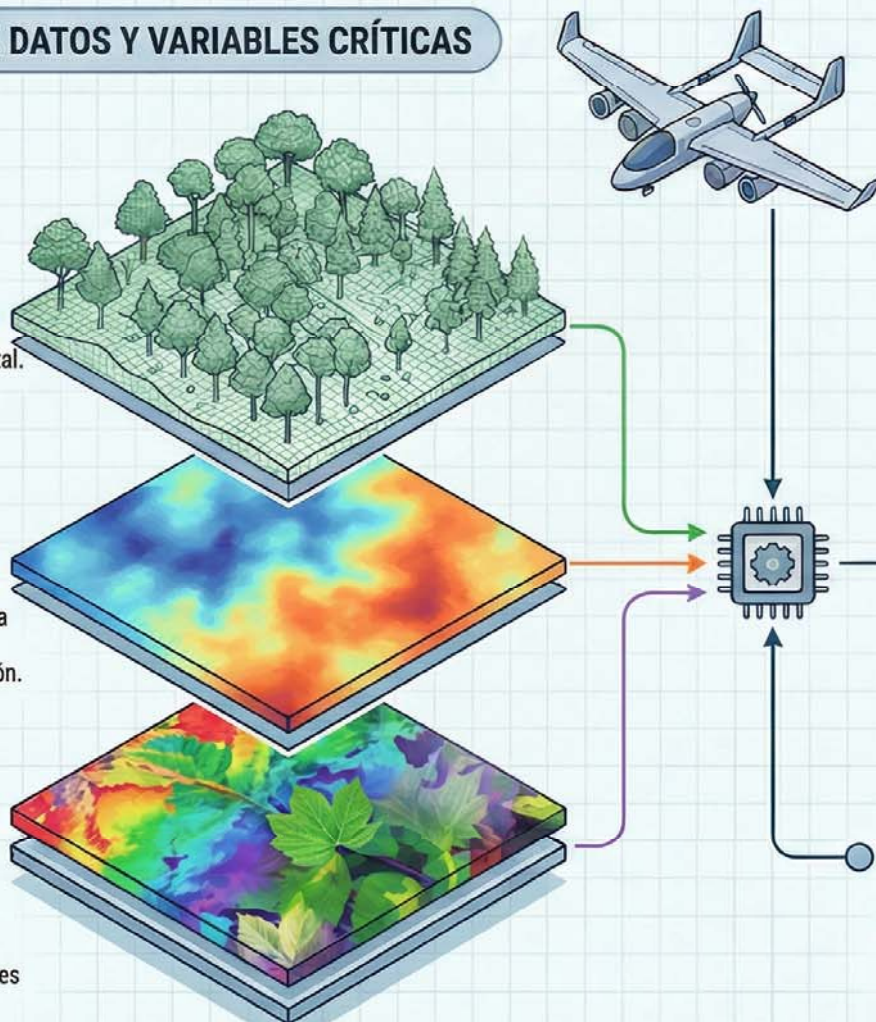
Estrés Hídrico y Térmico

Utiliza sensores térmicos para medir la temperatura y el estado hídrico de la vegetación.



Datos Bioquímicos (Ópticos)

Captura rasgos químicos y biológicos a través de sensores ópticos e hiperespectrales.



EL MODELO HOLÍSTICO Y FUSIÓN DE DATOS

Sinergia de Datos Integrados

La unión de LIDAR e Hiperespectral combina la estructura 3D con rasgos bioquímicos.

Superación de Limitaciones

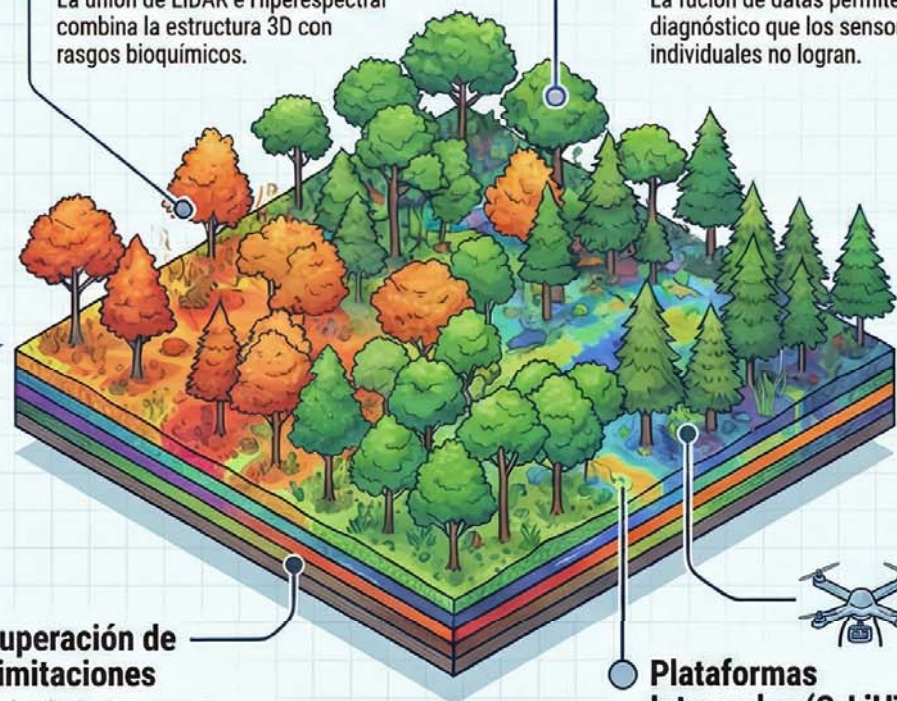
La fusión de datos permite un diagnóstico que los sensores individuales no logran.

Superación de Limitaciones

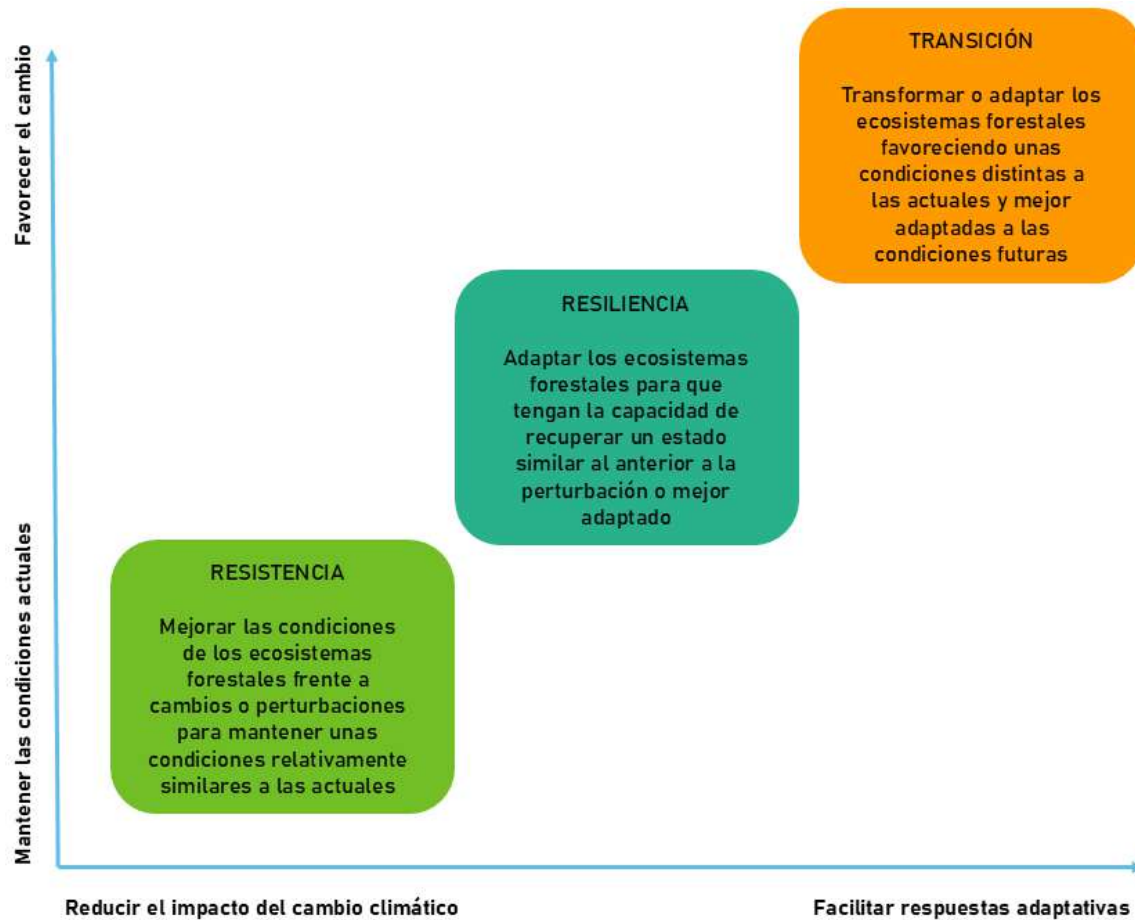
La fusión de datos permite un diagnóstico que los sensores individuales no logran.

Plataformas Integradas (G-LiHT)

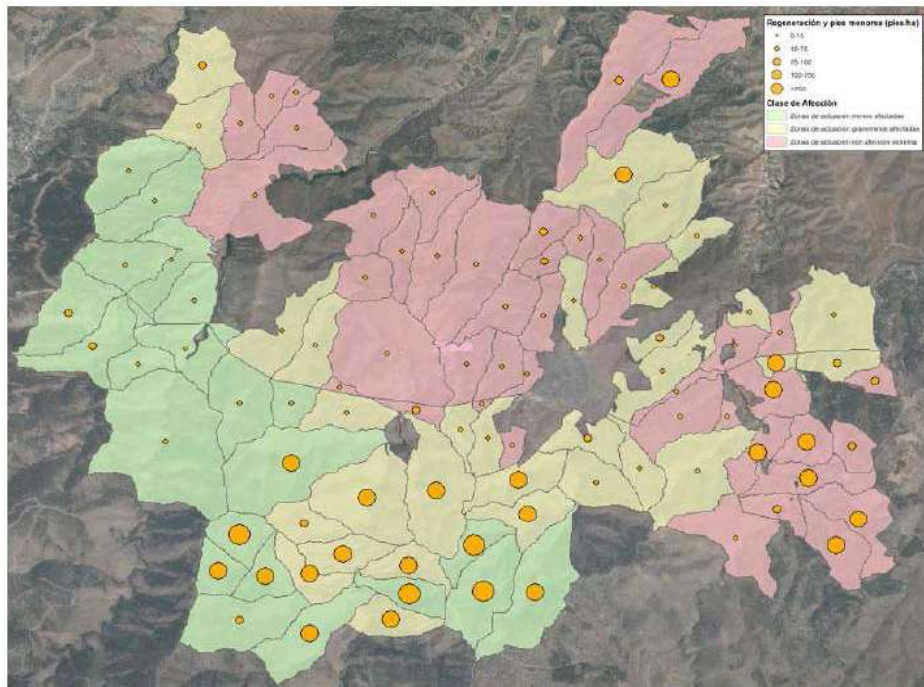
Sistemas aéreos que portan múltiples instrumentos para la captura simultánea de datos



El triángulo del monitoreo forestal

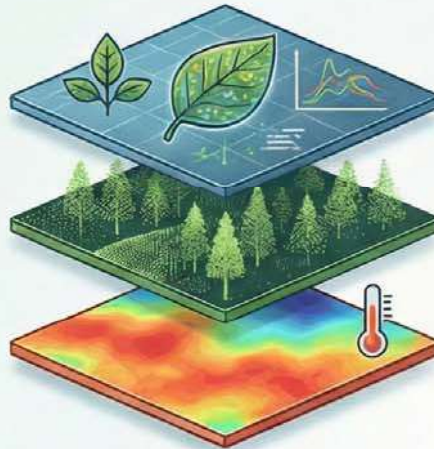


Sanidad forestal: redefiniendo la selvicultura



Integración de sensores: hacia un modelo holístico

El monitoreo forestal moderno fusiona teledetección, datos in-situ y modelado para crear un sistema de alerta temprana y gestión forestal eficiente, utilizando rasgos espectrales como lenguaje común.



Óptico & Hiperespectral (EnMAP)

Detección química y de rasgos espectrales.

LiDAR (Estructura 3D)

Información sobre la estructura física del bosque.

Térmico & Estrés

Niveles de temperatura y estrés hídrico.

Fusión Multi-Sensor y Datos

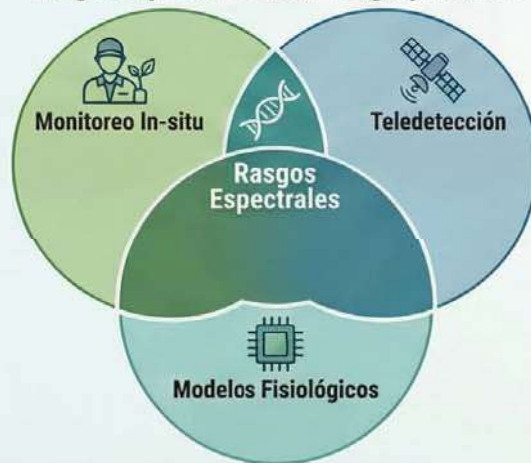
Integración de Óptico, LiDAR y Térmico para modelos fisiológicos 3D completos.



Complementariedad Tierra-Espacio

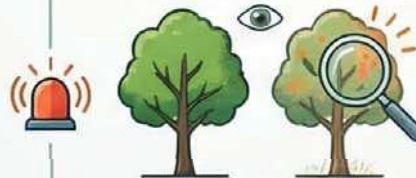
Ningún sensor es suficiente por sí solo; vital unir el monitoreo in-situ con teledetección.

Rasgos Espectrales como Lenguaje Común



Gestión Forestal y Alerta Temprana

Detección Temprana de Estrés



Identificación de síntomas espectrales sutiles antes de que el daño sea visible al ojo humano.

Gestión Adaptativa y Eficiencia



Priorización de tratamientos en zonas de alto riesgo y dirección optimizada del personal de campo.

Democratización y Big Data



Uso de archivos gratuitos (Landsat/ESA) y procesamiento en la nube para sistemas operativos globales.

Sensor / Tecnología	Aporte Específico al Sistema
LiDAR	Provee información sobre la estructura física del bosque.
Hiperespectral (EnMAP)	Permite la detección química y de rasgos espectrales.
Térmico	Identifica niveles de temperatura y estrés hídrico.

Algunas ideas para terminar

01

HACIA UNA MEJOR DEFINICIÓN/DIAGNÓSTICO DE LOS AGENTES DE SANIDAD FORESTAL

Hay muchas situaciones que comprometen la salud de nuestros bosques, pero debemos hacer el esfuerzo de ser más precisos en los diagnósticos para evitar generar situaciones ambiguas que no ayudan a comprender los procesos asociados, y generan confusión entre gestores y afectados.

55/61

Algunas ideas para terminar

01

HACIA UNA MEJOR DEFINICIÓN/DIAGNÓSTICO DE LOS AGENTES DE SANIDAD FORESTAL

Hay muchas situaciones que comprometen la salud de nuestros bosques, pero debemos hacer el esfuerzo de ser más precisos en los diagnósticos para evitar generar situaciones ambiguas que no ayudan a comprender los procesos asociados, y generan confusión entre gestores y afectados.

02

OPTIMIZANDO E INTEGRANDO LA INFORMACIÓN

Los métodos tradicionales de inventario (basado en parcelas de campo, redes, ICP-SEDA) suministran información adecuada para la estimación de variables descriptivas de los procesos (agentes) relacionados con la sanidad forestal, pero claramente insuficiente para evaluar (especialmente) los procesos asociados al estado sanitario del arbolado (agentes bióticas y/o abióticos). En ese sentido, es necesario incorporar nuevas fuentes de datos (teledetección) que permiten disponer de un sistema integrado de seguimiento de daños en bosques, y que supone la “infraestructura de datos” básica de información sobre sanidad forestal de las CCAA

56/61

Algunas ideas para terminar

03

DESARROLLO DE MEDIDAS DE CONTROL

Los análisis de los sistemas de seguimiento de sanidad forestal (basados en teledetección) deben tener una clara orientación práctica (no sólo científica), e intentar dar respuesta a los graves problemas de sanidad forestal que estamos enfrentado a corto y medio plazo. Pero también deben contribuir a dar soporte científico (no sólo experimental) a muchas de las decisiones que se tomen.

57/61

Algunas ideas para terminar

03

DESARROLLO DE MEDIDAS DE CONTROL

Los análisis de los sistemas de seguimiento de sanidad forestal (basados en teledetección) deben tener una clara orientación práctica (no sólo científica), e intentar dar respuesta a los graves problemas de sanidad forestal que estamos enfrentado a corto y medio plazo. Pero también deben contribuir a dar soporte científico (no sólo experimental) a muchas de las decisiones que se tomen.

04

HACIA UNA SELVICULTURA DE LA SANIDAD FORESTAL

La selvicultura aplicada a situaciones de daños en bosques debe basarse en datos adecuados de diagnóstico (tanto temporal como espacialmente), así como en una reconsideración de los tipos de actuaciones que debe ofrecer estados selvícolas “intermedios” que permitan responder a un amplio e incierto rango de condiciones sanitarias futuras (selvicultura de adaptación proactiva).

58/61

Algunas ideas para terminar

05

HACIA UNA INTEGRACIÓN DE REDES

Hay que fomentar la integración de Redes de Seguimiento de bosques a diferentes escalas (ICP-NI/NII, autonómicas, LTER, ReDec, SilvAdpat, etc.) con nuevas aproximaciones metodológicas (dendrocronología, teledetección, ecofisiología, etc.) para reforzar la capacidad de análisis temporal y espacial del estado de los bosques, así como su relación con los diferentes factores de estrés.

59/61

Algunas ideas para terminar

05

HACIA UNA INTEGRACIÓN DE REDES

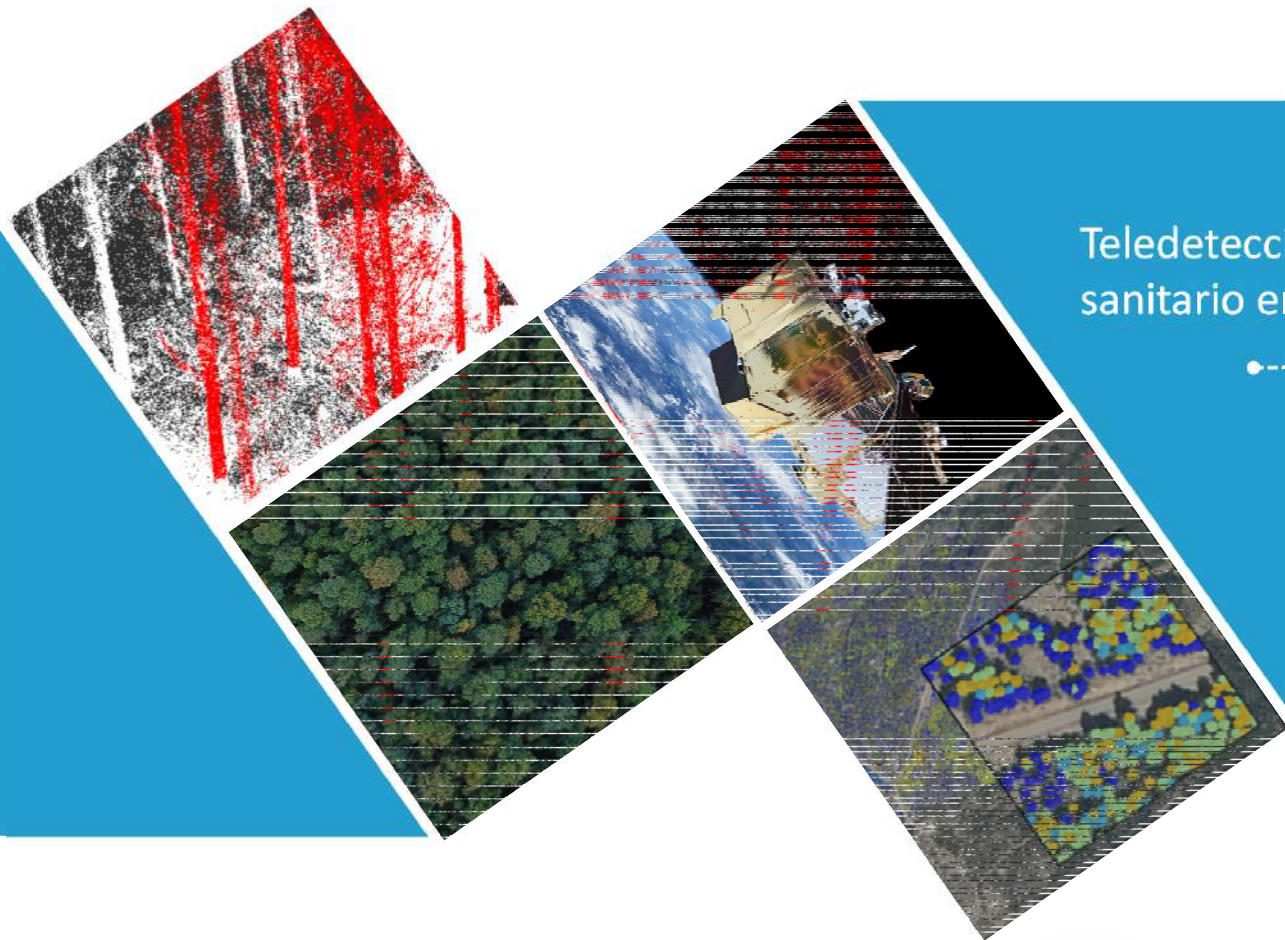
Hay que fomentar la integración de Redes de Seguimiento de bosques a diferentes escalas (ICP-NI/NII, autonómicas, LTER, ReDec, SilvAdpat, etc.) con nuevas aproximaciones metodológicas (dendrocronología, teledetección, ecofisiología, etc.) para reforzar la capacidad de análisis temporal y espacial del estado de los bosques, así como su relación con los diferentes factores de estrés.

06

DIVULGACIÓN Y TRANSFERENCIA

Hay que fortalecer las actividades de Transferencia, Divulgación y Formación vinculadas a la sanidad forestal para potenciar la capacidad de innovación del conocimiento generado por diferentes instituciones, junto con proyectos de I+D con enfoques de alto riesgo / gran potencial tecnológico.

60/61



Teledetección multifuente para el diagnóstico sanitario en ecosistemas forestales.

MUCHAS GRACIAS

12 de febrero de 2026 (Huelva)