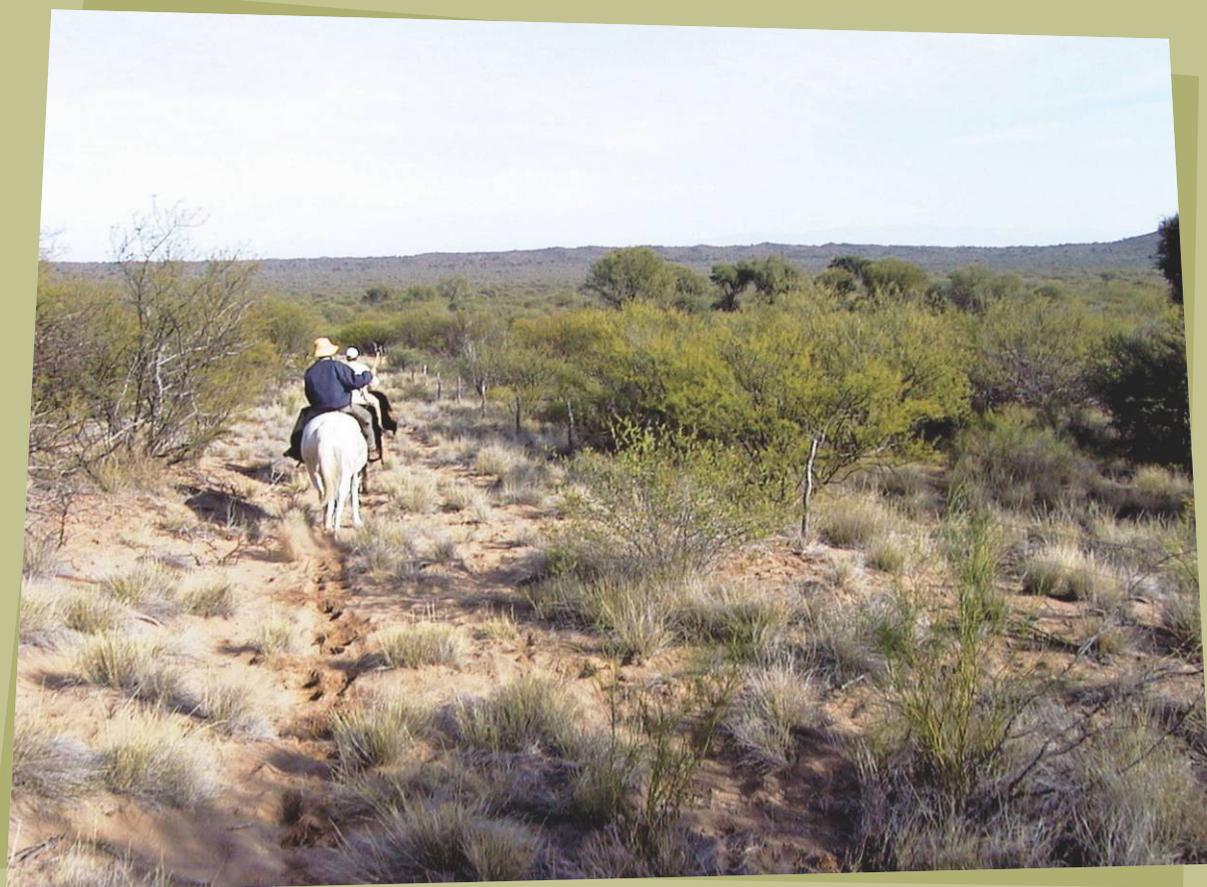


Manual para evaluación de pastizales naturales del Chaco Árido con fines ganaderos

Compiladores: Lisandro Blanco y Emiliano Quiroga



Manual para evaluación de pastizales naturales del Chaco Árido con fines ganaderos

*Compiladores:
Lisandro Blanco y Emiliano Quiroga*



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina

INTA Ediciones

*Centro Regional Catamarca - La Rioja
Estación Experimental Agropecuaria La Rioja*

2020

633.2.033 *Manual para evaluación de pastizales naturales del Chaco Árido con fines ganaderos / M31*
compiladores: Lisandro Blanco y Emiliano Quiroga. – Buenos Aires : INTA Ediciones, Estación Experimental Agropecuaria La Rioja, 2019.
66 p. : il.

ISBN 978-987-8333-27-4 (digital)

i. Blanco, Lisandro. – ii. Quiroga, Emiliano

PASTIZALES – PASTIZAL NATURAL – EVALUACION – GANADERIA – REGION CHAQUEÑA – CHACO SEMIARIDO

INTA - DD

Este documento es resultado del financiamiento otorgado por el Estado Nacional, por lo tanto, queda sujeto al cumplimiento de la Ley N° 26.899.

Se enmarca dentro del Proyecto Específico “Desarrollo, Integración y Transferencia de Tecnologías para Manejo Sustentable de Servicios de la Vegetación Natural para Fines Ganaderos” (PNPA-1126074), y de los Proyectos Regionales: “Aportes al Desarrollo del Área Geográfica Llanos Norte con Estrategias de Enfoque Territorial” (CATRI-1233205) y “Estrategias de Gestión de Recursos Ambientales, Tecnológicos y Sociales para el Desarrollo Sustentable del Sector Agropecuario de Llanos Sur” (CATRI-1233206).

*Este libro
cuenta con licencia:*



AUTORES

CAPÍTULO I:

*Lisandro Blanco, Emanuel Luna Toledo
y Alicia Sancho (INTA EEA La Rioja)*

CAPÍTULO II:

*Walter Agüero, José Molina
y Fernando Biurrún (INTA EEA La Rioja)*

CAPÍTULO III:

*Emiliano Quiroga¹, Armando Ricarte²,
Pedro Namur (h)², Raul Díaz² y Luis Guzmán²
(1: INTA EEA Catamarca - 2: INTA EEA La Rioja)*

CAPÍTULO IV:

Roxana Ávila y Carlos Ferrando (INTA EEA La Rioja)

ÍNDICE DE TEMAS

> PRÓLOGO	05
> CAPÍTULO I:	06
DETERMINACIÓN DE PATRONES ESPACIALES DE LA VEGETACIÓN A ESCALA DE POTRERO MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES	
1. <i>Introducción</i>	06
2. <i>Principios físicos de la teledetección</i>	06
3. <i>La imagen digital</i>	14
4. <i>Comparación de sensores satelitales</i>	19
5. <i>Procesamiento digital de imágenes satelitales</i>	24
6. <i>Bibliografía</i>	39
> CAPÍTULO II:	40
CARACTERIZACIÓN FISONÓMICA-FLORÍSTICA DE LA VEGETACIÓN	
1. <i>Introducción</i>	40
2. <i>¿Qué es una comunidad vegetal?</i>	41
3. <i>¿Por qué y para qué estudiar las comunidades vegetales?</i>	41
4. <i>Sobre las mediciones en las comunidades vegetales</i>	42
5. <i>Metodologías</i>	43
6. <i>Análisis de datos y base conceptual</i>	48
7. <i>Comentarios finales</i>	51
8. <i>Bibliografía</i>	51
> CAPÍTULO III:	52
ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD FORRAJERA	
1. <i>Introducción</i>	52
2. <i>Método de la cosecha</i>	52
3. <i>Método del doble muestreo</i>	53
4. <i>Método de la cosecha adaptado para incluir leñosas, o método del prisma</i>	54
5. <i>Esquema comparativo de los tres métodos</i>	54
6. <i>Descripción de etapas comunes a seguir para llevar adelante cada método de muestreo</i>	55
7. <i>Bibliografía</i>	58
> CAPÍTULO IV:	59
PRESUPUESTACIÓN FORRAJERA	
1. <i>Introducción</i>	59
2. <i>Factores determinantes</i>	59
3. <i>Cálculo de la oferta forrajera útil</i>	60
4. <i>Cálculo de la demanda forrajera</i>	60
5. <i>Ejemplos de presupuestación forrajera</i>	62
6. <i>Bibliografía</i>	66

PRÓLOGO

La ecología y manejo de pastizales forman parte de la esencia conceptual de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA La Rioja desde su creación. Así, desde sus comienzos se fue forjando un grupo de trabajo basado en el principio de generar y adaptar tecnologías para desarrollar una ganadería compatible con la sustentabilidad de los frágiles ecosistemas áridos y semiáridos.

Desde ese génesis, la búsqueda y adaptación de metodologías que permitan diagnosticar, valorar, planificar y monitorear en el tiempo la compleja heterogeneidad de los pastizales de esta región, fue un aspecto central en el trabajo cotidiano de aquellos investigadores.

Las metodologías que hoy aplicamos para cuantificar y describir estos pastizales del Chaco Árido, llevan impresa las experiencias de nuestros pioneros, David Lee Anderson, Enrique Oriente, Juan Carlos Vera, Jorge Del Águila, Abel Bernardón y Pedro Namur entre otros. Luego, esas metodologías evolucionaron a medida que se incorporaron nuevos desafíos de estudio, con la impronta de colegas que compartieron con aquel equipo y nos acompañan cotidianamente hoy, como Carlos Ferrando y Fernando Biurrun.

En este transitar, los avances tecnológicos fueron marcando la huella, y se incorporaron las imágenes satelitales como elemento clave para que "... el árbol no tape el bosque ..." cuando observamos los pastizales y describimos su heterogeneidad espacial. También los avances en la informática nos brindan herramientas de análisis cada vez más poderosas, para procesar gran cantidad de información en tiempos muy breves.

Hoy, el INTA EEA La Rioja dispone de un protocolo, que aunque siempre está bajo la lupa revisora, es aceptado y utilizado cotidianamente por los colegas en la región. Así, es objetivo de este manual describir las bases conceptuales y los procedimientos involucrados en este protocolo

metodológico para diagnosticar, valorar, planificar y monitorear pastizales naturales para fines ganaderos. Se pretendió utilizar un lenguaje relativamente coloquial, incluir figuras y presentar ejemplos, para facilitar al lector la interpretación de las mismas. Se brinda además una amplia bibliografía que permite acceder a los alcances, pero también a las limitaciones, de las metodologías involucradas en el protocolo.

El manual es presentado en cuatro capítulos que transitan desde la determinación de patrones espaciales de la vegetación utilizando sensores remotos satelitales, pasando por la descripción fisonómica y florísticas de las unidades de vegetación detectadas, su posterior valoración forrajera, para finalmente hacer la presupuestación forrajera.

Los autores entienden a este manual como una primera edición que estará abierta a futuras modificaciones, propias de los nuevos aportes de los avances tecnológicos, y de la detección continua de limitaciones, tanto por sus propios autores como por sus lectores y aplicadores. ☑



CAPÍTULO I: DETERMINACIÓN DE PATRONES ESPACIALES DE LA VEGETACIÓN A ESCALA DE POTRERO MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES

Lisandro Blanco, Emanuel Luna Toledo y Alicia Sancho (INTA EEA La Rioja)

1. INTRODUCCIÓN

Todos los elementos de la corteza terrestre, rocas, suelos, vegetación y agua, así como los objetos que la recubren, absorben, reflejan o emiten una cantidad de energía que depende de la longitud de onda, de la intensidad y tipo de radiación incidente, así como también de las características de absorción de los objetos y de la orientación de estos respecto al sol o fuente de iluminación.

El ojo humano tiene ciertas limitaciones en lo que a la percepción se refiere. Por un lado, sólo podemos captar un cierto tipo de energía dentro de lo que llamamos el rango visible, el calor y las microondas que son otras formas de energía, no podemos percibir las directamente. Por otro lado no podemos ver más allá de lo que nuestra estatura o desde plataformas naturales podemos ver, de todos modos siempre tenemos una visión oblicua y no podemos captar grandes extensiones como por ejemplo grandes incendios o inundaciones. Por eso necesitamos “ojos artificiales” o sensores que nos permiten solucionar estos inconvenientes.

Se han creado sensores que pueden captar otros tipos de energía como la ultravioleta, infrarroja o microondas desde plataformas a una cierta altitud, desde las cuales se puede tener una visión vertical y panorámica, lo cual es una gran ventaja. El objetivo básico del sensoramiento remoto o teledetección es obtener información a

distancia de los objetos que vemos en la superficie de la tierra. El término sensoramiento remoto proviene de la traducción del inglés “remote sensing”, pero en la lengua castellana usamos normalmente las palabras teledetección o percepción remota o simplemente sensores remotos. La palabra “sensoramiento remoto” envuelve todo el proceso de adquirir la información mientras que el procesamiento digital de imágenes implica un conjunto de métodos para obtener esa información. Existen también otros métodos, por ejemplo las imágenes pueden ser tratadas con métodos fotogramétricos para su interpretación visual o los datos de reflexión espectral pueden ser comparados con espectros ya conocidos. Una de las razones por la cual el procesamiento digital de imágenes se ha transformado en una herramienta tan importante es que los datos son almacenados en forma digital, lo cual permite una manipulación mucho más amplia de los mismos que no son posibles por medios fotográficos. ☑

2. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

2.a. La naturaleza de la radiación

Para que haya percepción remota debe existir algún tipo de interacción entre los objetos observados y el receptor.

Hay tres formas de adquirir información por medio de los sensores remotos, por reflexión, emisión y por emisión-reflexión (Figura 1). La primera es la más importante en teledetección, y es la energía proveniente de la luz solar que reflejan los objetos. La segunda es la energía emitida

por los propios objetos, como una ciudad iluminada por la noche. Finalmente la tercera, es aquella que el mismo sensor emite y luego capta la reflexión como es el caso de los sensores activos (radar).

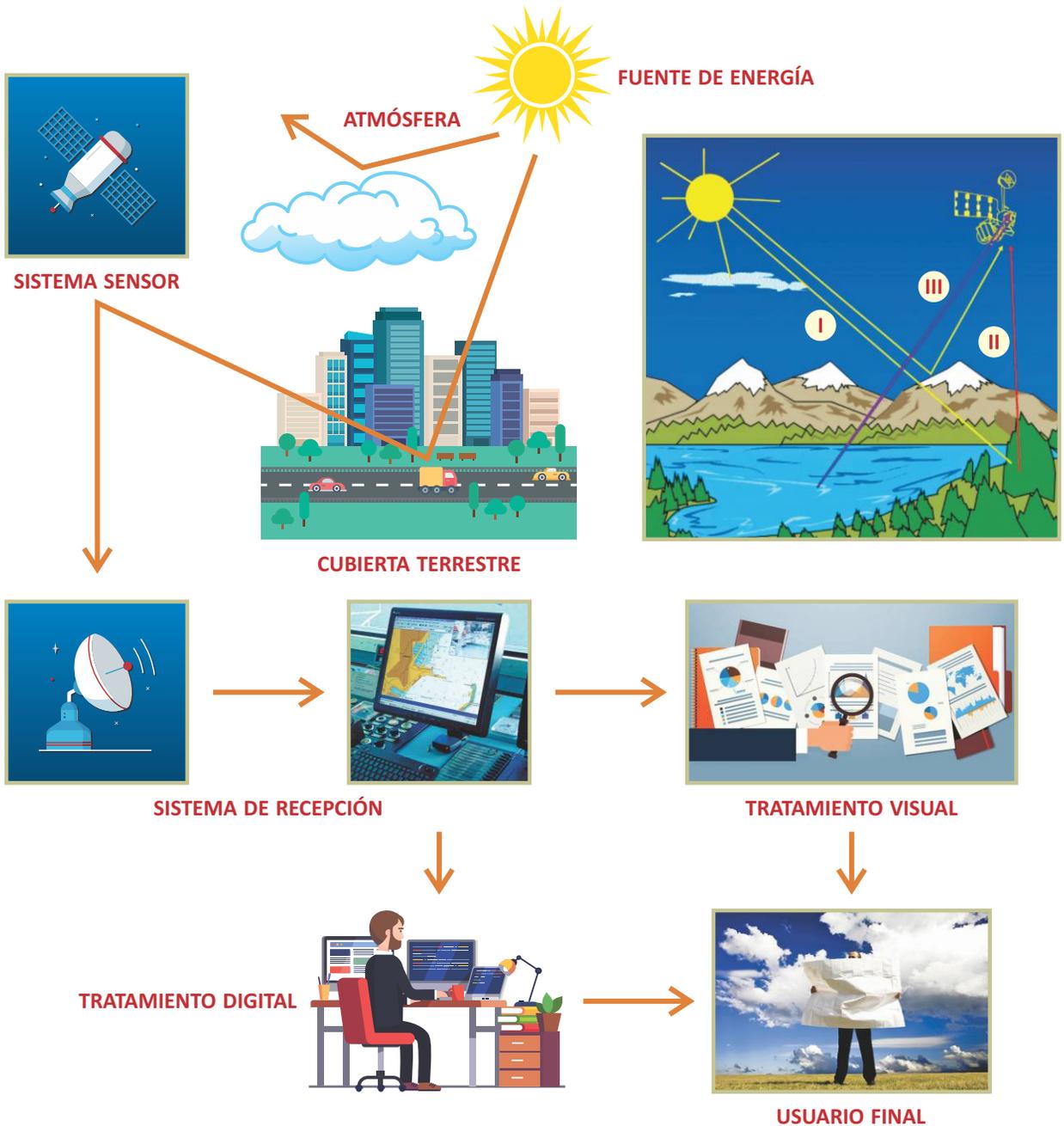


Figura 1. Sistema de teledetección satelital, contemplando la fuente energética, la interacción de la energía con la atmósfera y la cubierta terrestre, la detección de la energía reflejada por el sensor montado en el satélite, la recepción terrestre de la información, el archivo de esta información y su posterior utilización mediante tratamiento digital (Panel izquierdo). Comparación de tres fuentes energéticas posibles de receptor por el sensor satelital (Panel derecho), la energía proveniente del sol reflejada por la cubierta (I), la energía térmica emitida por la cubierta en función de su temperatura (II) y la energía emitida por el sensor activo (por ejemplo radar) y reflejada por la cubierta (III).

En todos los casos lo que capta el sensor es una forma de energía electromagnética. Esta energía se desplaza siguiendo un movimiento armónico a la velocidad de la luz ($c = 3 * 10^8 \text{ m s}^{-1}$) y se la mide o reconoce por dos parámetros inversamente proporcionales entre sí, frecuencia (f) y longitud de onda (λ). Cuando la longitud de onda es mayor (o la frecuencia es menor) el contenido de energía (Q) de la onda electromagnética es menor, por eso es más difícil de detectar, en cambio las longitudes de onda corta son más fáciles de detectar con sistemas comunes por su mayor contenido energético. Si bien las longitudes de onda varían en forma continua se suelen establecer una serie de bandas donde el comportamiento de las ondas es similar, esto es lo que se conoce como el espectro electromagnético (Figura 2). Allí se grafican desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta las kilométricas (Telecomunicaciones). Para medir las más cortas se usan los micrones $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ y las más largas cm o m. Otra forma de medirlas o designarlas es por la frecuencia en GHz, donde $1\text{GHz} = 10^9 \text{ Hz}$.

$$Q = hf = h(c/\lambda)$$

Donde: h es la constante de Plank ($6,6 * 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$)

Desde el punto de vista de la teledetección conviene destacar la serie de bandas más frecuentemente empleadas que son:

> **Espectro visible (0,4 a 0,7 μm):** se denomina así porque se trata de la radiación electromagnética que pueden percibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda donde es la máxima radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan

azul (0,4 a 0,5 μm), verde (0,5 a 0,6 μm) y rojo (0,6 a 0,7 μm) en razón de los colores elementales asociados a estas longitudes de ondas.

> **Infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 μm):** a veces también se lo llama infrarrojo reflejado o fotográfico, porque se puede captar con películas especiales. Resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales o concentraciones de humedad.

> **Infrarrojo medio (1,3 a 8 μm):** en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre.

> **Infrarrojo lejano (8 a 14 μm):** es la porción emisiva del espectro terrestre.

> **Microondas (a partir de 1 mm):** es de gran interés porque es una energía transparente a la superficie nubosa.

Todo elemento emite radiación dependiendo de su temperatura y condiciones físicas, un cuerpo negro es un receptor y emisor de energía. Toda emisión se encuentra en función de la temperatura del cuerpo emisor, tal como lo representa la ley de Stefan-Boltzman:

$$Q = \sigma T^4$$

Donde: T es la temperatura absoluta del cuerpo emisor y σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5,67 * 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$).

Luego, la cantidad de energía radiante que contiene un cuerpo es inversamente proporcional a la longitud de onda con la cual la emite (Figura 3). Así, se puede calcular la longitud de onda a la que ocurre la mayor emitancia de un cuerpo negro (Ley de Wien), en función de su temperatura:

$$\lambda \text{ máximo} = 2898 \mu\text{m } ^\circ\text{K}/T$$

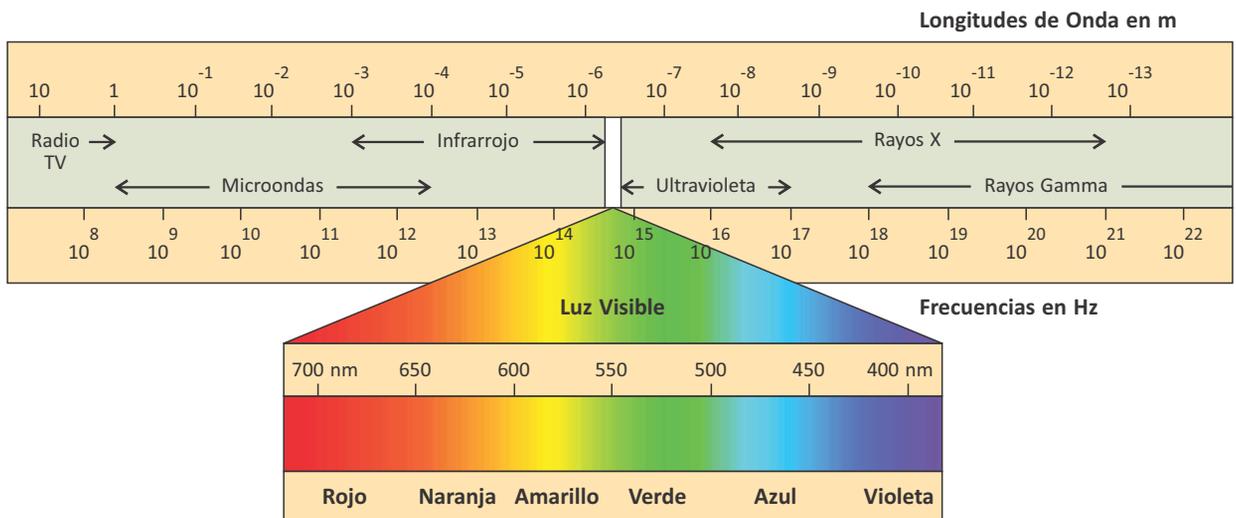


Figura 2. Espectro electromagnético. Las longitudes de onda (λ) expresadas en m en escala logarítmica y las frecuencias (f) en Hz. Se realiza una ampliación específica en el rango visible (0,4 a 0,7 μm o 400 a 700 nm).

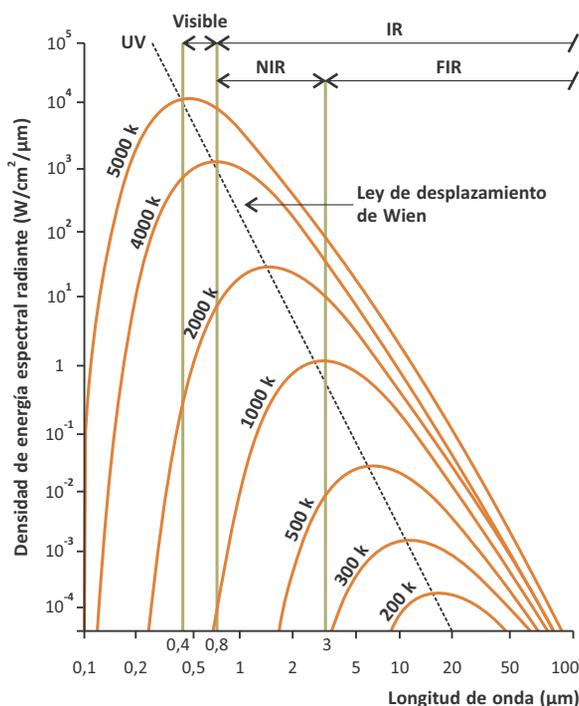


Figura 3. Ley del desplazamiento (Ley de Wien) de la longitud de onda de emitancia máxima de cuerpos negros en función de la temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$).

De acuerdo a esta ley de λ máxima, el sol emite en relación a un cuerpo negro de 6000 $^{\circ}\text{K}$ tiene su máxima emitancia en $\lambda = 0,48 \mu\text{m}$ (región visible del espectro electromagnético). Contrariamente la tierra que emite en relación a un cuerpo negro de 300 $^{\circ}\text{K}$ presenta su máxima emitancia a $\lambda = 9,66 \mu\text{m}$ (región infrarrojo térmico del espectro electromagnético).

2.b. La interacción de la radiación con la atmósfera

Puesto que la atmósfera apenas refleja radiación solar, la modificación por parte de la atmosfera de la radiación entrante y saliente incluye transmisión, dispersión, refracción y absorción.

La dispersión es el re direccionamiento de la radiación por parte de los gases y aerosoles presentes en la atmósfera en cualquier dirección. Existen tres tipos básicos de dispersión:

> **Dispersión de Rayleigh:** La producen los gases atmosféricos en la alta atmósfera (9-10 km). Es mayor cuanto menor es la longitud de onda. La luz azul se dispersa cuatro veces más que la roja y la ultravioleta 16 veces más que la roja.

> **Dispersión de Mie:** Se produce en la baja atmósfera (0-5 km) debido a los aerosoles (polvo, polen, gotitas de

agua). Los aerosoles tienen un tamaño más o menos igual que la longitud de onda que dispersan. Afecta especialmente a la luz visible.

> **Dispersión no selectiva:** Se produce en la baja atmósfera. Las partículas son mayores que la radiación incidente. No depende de la longitud de onda.

Luego, la luminosidad de la atmósfera es efecto de la dispersión. Los sensores montados en satélites registran esta luminosidad, además de la energía reflejada por los objetos situados sobre la superficie terrestre. El resultado es que aumenta el brillo general de la imagen, disminuye el contraste (los objetos brillantes aparecen más oscuros y los oscuros más brillantes), y se difuminan los bordes de los objetos.

La refracción, se trata de un cambio de dirección de la luz que ocurre cuando la luz atraviesa dos medios con diferente densidad (diferentes capas de la atmósfera por ejemplo). Causa espejismos en días cálidos y degrada la respuesta espectral de los objetos. Finalmente, cada uno de los gases atmosféricos tiene capacidad para absorber radiación en diferentes longitudes de onda. Fundamentalmente son tres los gases que absorben radiación: Ozono (absorbe radiación ultravioleta), dióxido de carbono (absorbe radiación entre 13,0 y 17,5 μm , y vapor de agua (absorbe radiación entre 5,5 y 7,0 μm y por encima de 27,0 μm).

De este modo aparecen una serie de regiones en el espectro en las que la radiación es absorbida por uno o varios de los gases. Esto deja, por otro lado, regiones del espectro denominadas ventanas atmosféricas (Figura 4). Por tanto la teledetección sólo va a ser en principio viable en estas ventanas.

2.c. La interacción de la radiación con las cubiertas terrestres

Luego de atravesar la atmósfera la energía electromagnética proveniente del sol interactúa con las diferentes cubiertas terrestres. Así, cuando la radiación solar incidente (E_i) entra en contacto con la cubierta terrestre ocurren tres procesos (Figura 5), parte es reflejada (E_r) hacia la atmósfera, parte es absorbida (E_a) incrementando la temperatura de la cubierta y finalmente parte es transmitida (E_t) a los objetos circundantes. Por lo tanto, el balance energético en un punto dado de la cubierta terrestre responde a la ecuación:

$E_i = E_r + E_a + E_t$, expresado de otra forma, $1 = r + a + t$, donde:

$r = E_r / E_i$, (reflectancia)

$a = E_a / E_i$, (absorbancia)

$t = E_t / E_i$, (transmitancia)

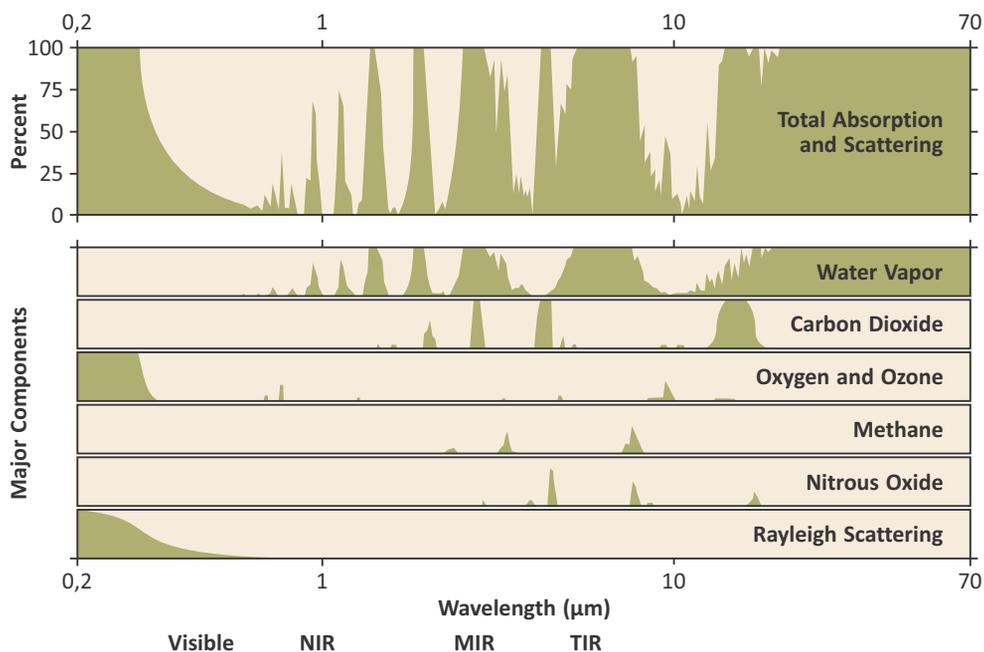


Figura 4. Distribución de las ventanas atmosféricas a lo largo del espectro electromagnético, incluyendo la región visible, infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo térmico (TIR). Incluye la contribución de diferentes gases en los procesos que dificultan la transparencia atmosférica a la energía electromagnética de las diferentes regiones del espectro.

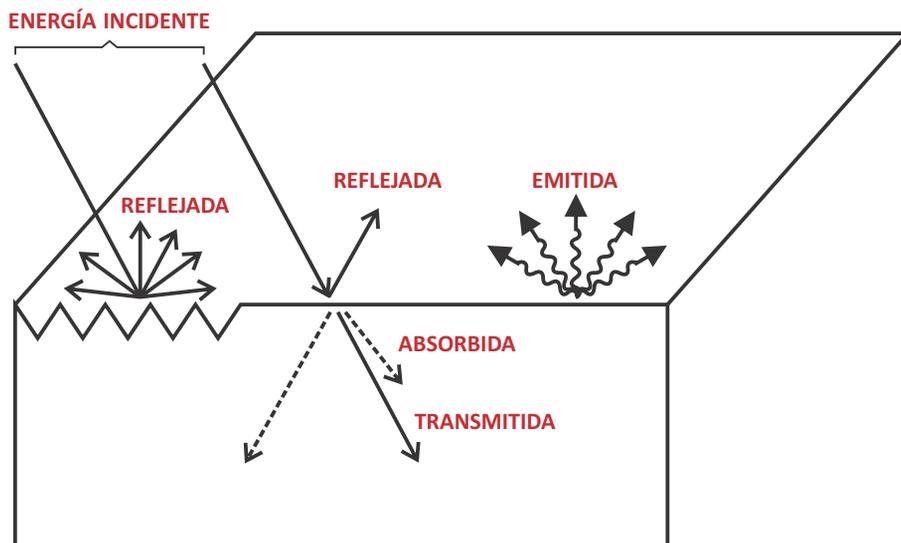


Figura 5. Interacción de la radiación electromagnética con la cubierta terrestre. Se destaca la diferencia en la naturaleza de la energía emitida por la cubierta terrestre en relación a la incidente, reflejada, transmitida y absorbida.

Para el estudio de los recursos naturales a partir del uso de sensores remotos satelitales, la reflectancia de las diferentes cubiertas terrestres recibe particular atención. A las variaciones de la reflectancia de una cubierta en

función de la longitud de onda (λ) de la energía electromagnética se la denomina firma espectral. Así, existen firmas espectrales típicas (Figura 6) de las principales cubiertas terrestres (agua, suelo, nieve y vegetación).

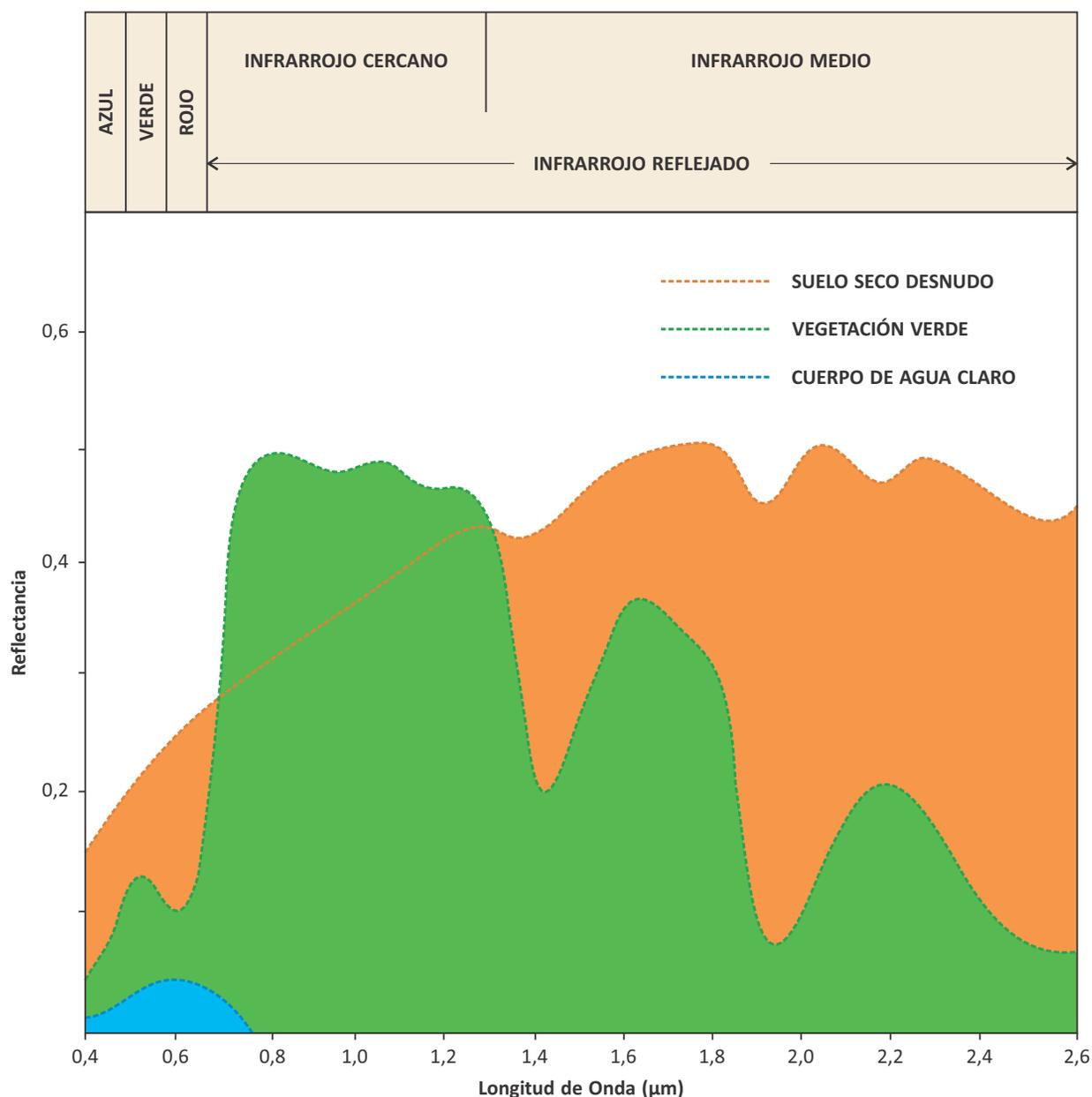


Figura 6. Firmas espectrales características de los principales tipos de cubiertas terrestres desde la región espectral visible hasta el infrarrojo medio.

En la vegetación el nivel de reflectancia se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad (Figura 7). El primero afecta a las longitudes de ondas del espectro visible (0,4 - 0,7 m) donde el 65% es absorbido por la clorofila, el 29% por la xantófila y el 6% por carotenos. La estructura de las hojas (capa esponjosa del mesófilo) a su vez aumenta la reflectancia en la zona del infrarrojo cercano (0,8 - 1,1 m). Finalmente, entre los rangos 1,4 m - 1,8 m (infrarrojo medio) la reflectancia depende del contenido de agua entre y dentro de las células.

En condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados, en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectancia. Si se analiza el comportamiento espectral del dosel vegetal, los factores que afectan su reflectancia son la proporción hojas, lignina y el efecto del suelo, la geometría de las hojas y los ángulos de observación de éstas.

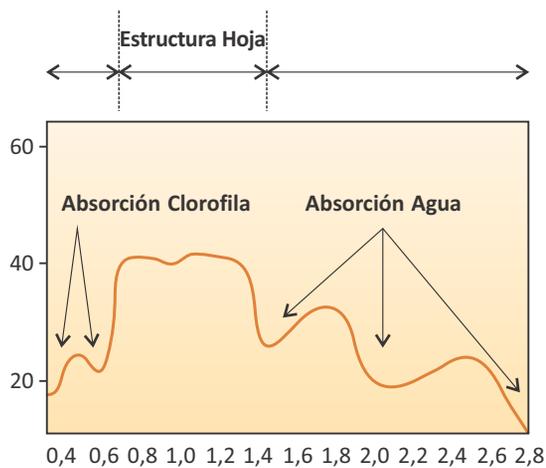


FIGURA A Longitud de Onda (μm)

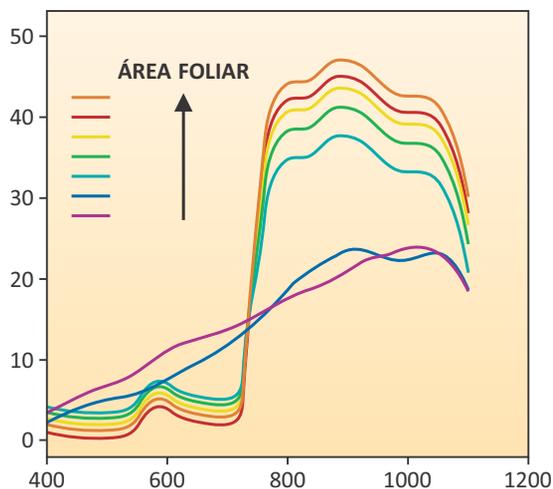
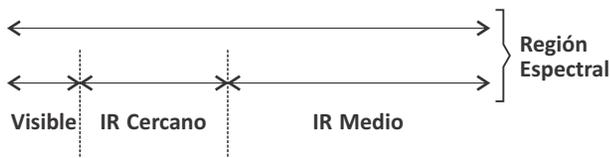


FIGURA C Longitud de Onda (nm)

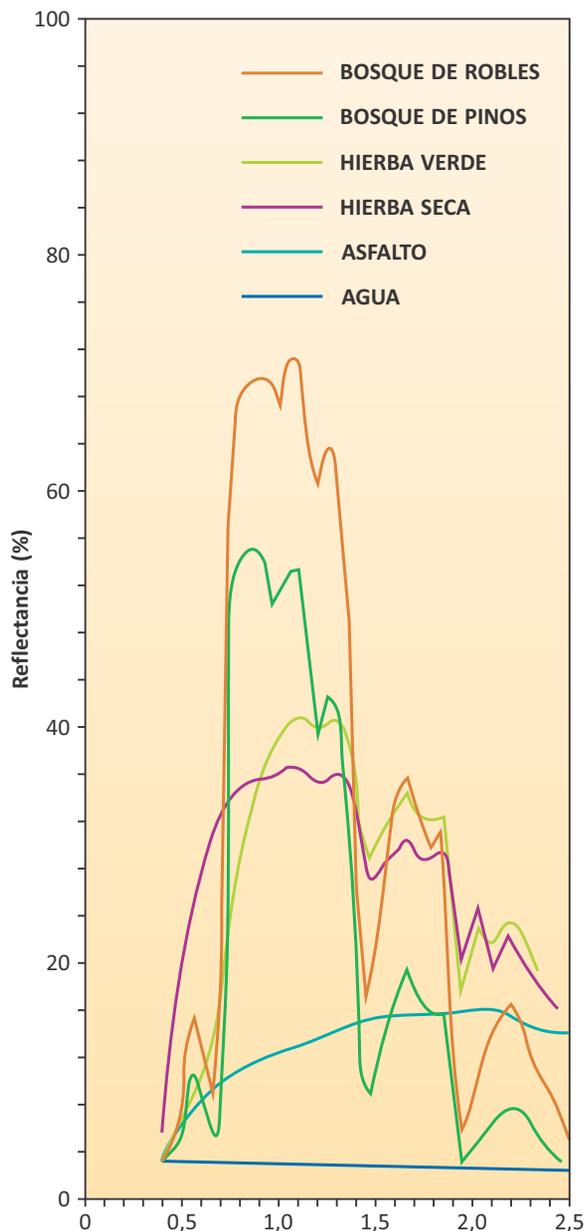


FIGURA B Longitud de Onda (μm)

Figura 7. Firma espectral de la vegetación. Factores que controlan el comportamiento espectral de la vegetación en diferentes regiones del espectro electromagnético (Figura A). Comportamiento espectral de diferentes tipos de vegetación (Figura B). Respuesta espectral del mismo tipo de vegetación con diferente índice de área foliar, resaltando cambios en el límite entre la región del rojo e infrarrojo cercano (Figura C).

Los principales factores que afectan el comportamiento espectral de los suelos son el color, el contenido de humedad y la granulometría (Figura 8). Cuando los suelos se encuentran secos las tierras ennegrecidas presentan mayor reflectancia, contrariamente cuando se encuentran con un alto contenido de agua poseen en promedio una reflectancia dos veces más débil que los suelos secos registrando las mayores diferencias en la zona de infrarrojo cercano.

En suelos secos, la reflectancia disminuye con el incremento en la granulometría, pero cuando se saturan de humedad la reducción de reflectancia es más marcada en suelos de granulometría fina. Otro factor que afecta la reflectancia de los suelos es el contenido de materia orgánica. En general, el incremento en el contenido de materia orgánica del suelo reduce la reflectancia del mismo.

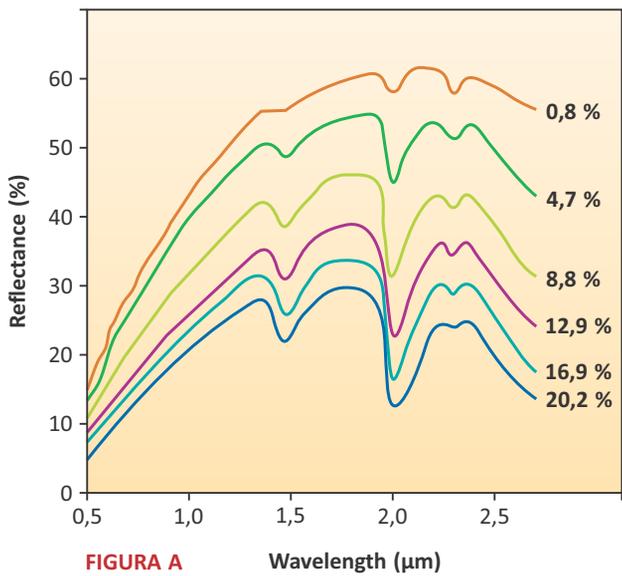


FIGURA A Wavelength (µm)

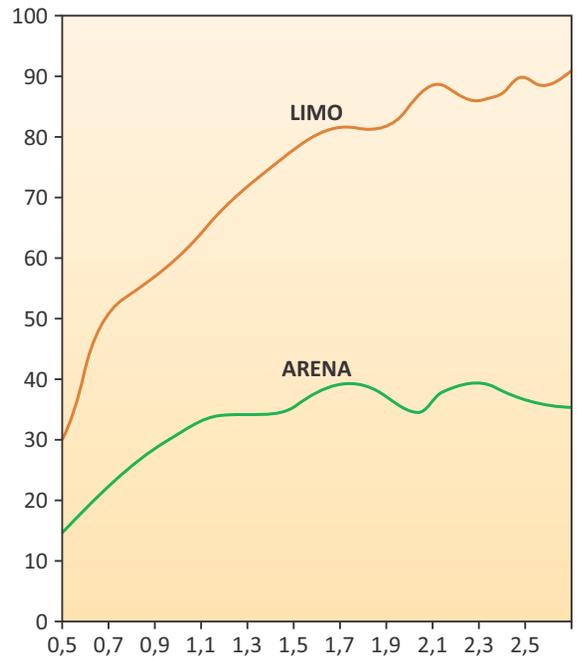


FIGURA B Wavelength (µm)

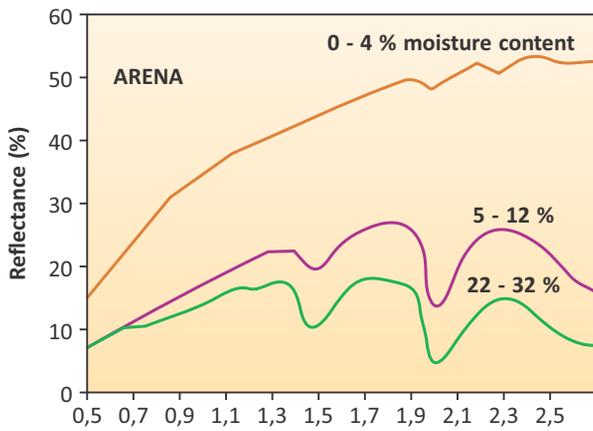


FIGURA C Wavelength (µm)

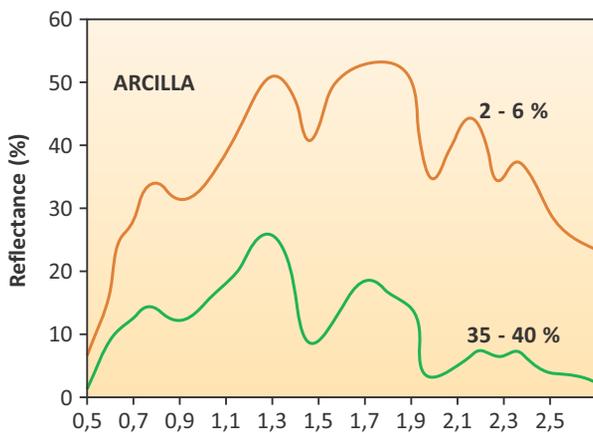


FIGURA C Wavelength (µm)

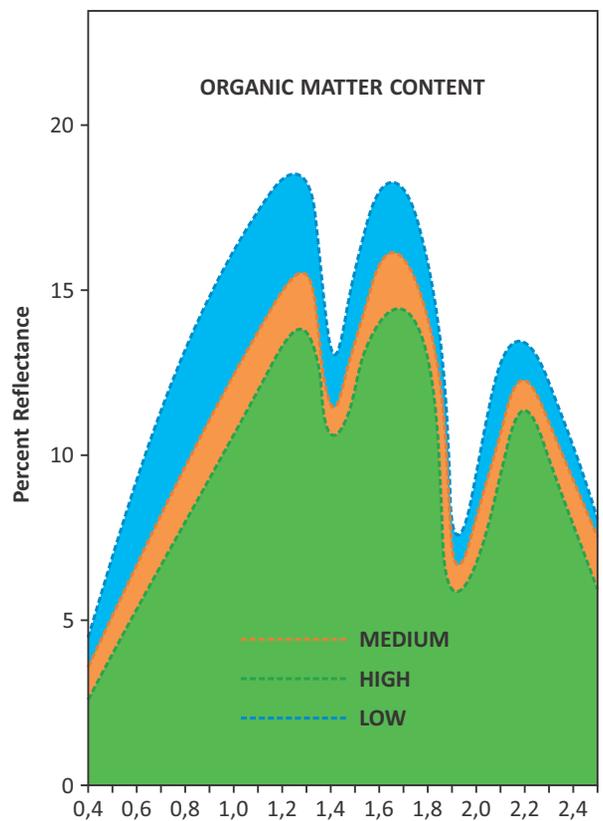


FIGURA D Wavelength (µm)

Figura 8. Firma espectral del suelo. Efecto del contenido de humedad sobre la respuesta espectral de un suelo franco limoso (Figura A). Efecto de la granulometría sobre la respuesta espectral de un suelo seco, limo vs arena (Figura B). Efecto de la interacción granulometría-contenido de humedad sobre la respuesta espectral, arena vs arcilla (Figura C). Efecto del contenido de materia orgánica sobre la respuesta espectral de un suelo (Figura D).

La reflectancia que presenta el agua es bastante baja y con una tendencia descendente a medida que aumenta la longitud de onda (Figura 9). Se ve afectada por factores como el contenido de clorofila, materiales en suspensión

y rugosidad superficial. Todos estos factores le incrementan la reflectancia en relación a una superficie de agua clara, quieta y profunda. ☑

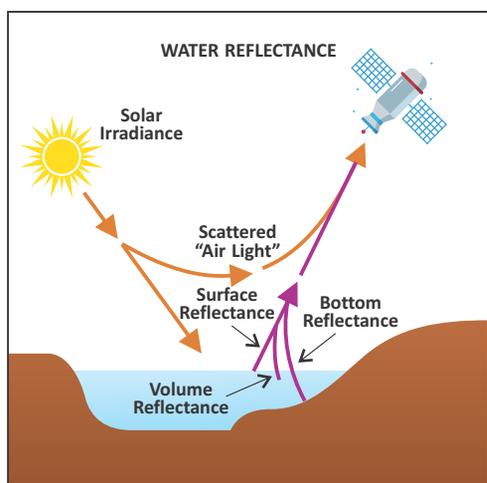


FIGURA A

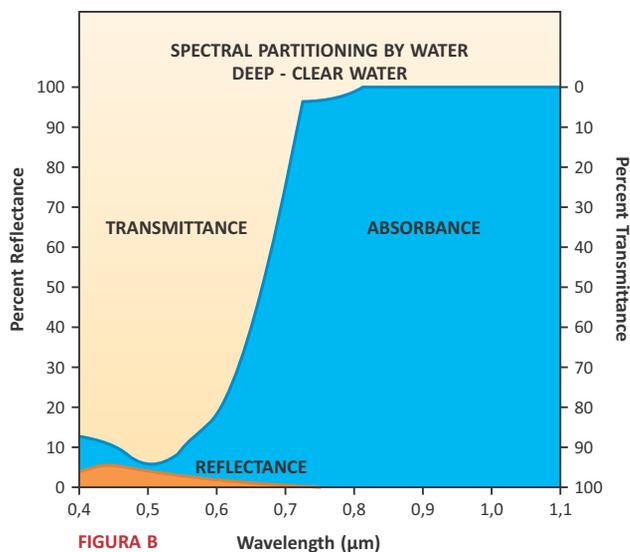


FIGURA B

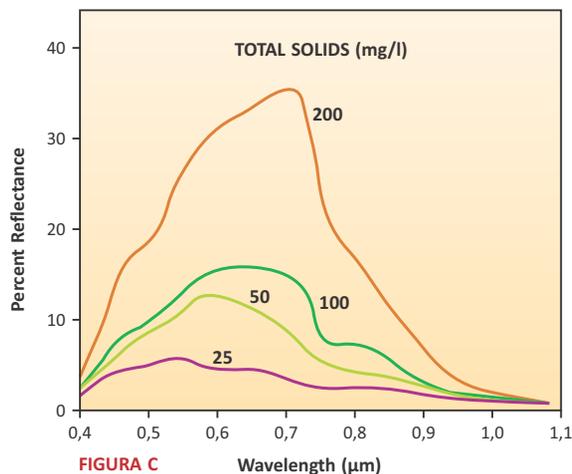
Wavelength (μm)

FIGURA C

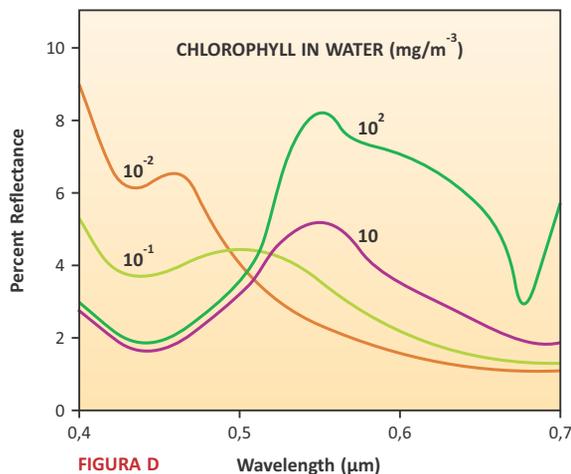
Wavelength (μm)

FIGURA D

Wavelength (μm)

Figura 9. Firma espectral del agua. Interacciones de la radiación solar frente a un cuerpo de agua, y su efecto sobre la energía electromagnética recibida por un sensor satelital (Figura A). Proporción de energía reflejada, transmitida y absorbida por un cuerpo de agua clara y profundo (Figura B). Efecto de la concentración de sólidos en suspensión sobre la reflectancia de un cuerpo de agua (Figura C). Efecto del contenido de clorofila disuelta sobre la reflectancia de un cuerpo de agua (Figura D).

3. LA IMAGEN DIGITAL

3.a. Concepto

La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial (a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor) que se emplea cada día con mayor asiduidad para la captura tanto de información temática (medioambiental), como de información topográfica (MDT, planimetría). Ello ha sido posible gracias al desarrollo que han experimentado, por un

lado, las técnicas de tratamiento digital de imágenes, lo cual ha facilitado, en todos los procesos, la obtención de datos significativos del territorio y por otro al acceso a la exhaustiva información digital proporcionada por sensores, en su aspecto espacial, radiométrico, espectral y temporal.

La fotogrametría se puede considerar la tecnología precursora de la teledetección. No obstante, para la captura de información desde satélites nos tenemos que remontar al año 1960 cuando la NASA (National

Aeronautics and Space Administration) pone en órbita el primer satélite de la serie TIROS, pionero de los destinados a la observación meteorológica, y en 1972 el ERTS 1 (Landsat 1), comenzando la era de la “teledetección espacial”. En la actualidad hay cientos de satélites de observación de la tierra en órbita, cada uno de los cuales porta uno o varios sensores diseñados para un tipo de aplicaciones específico.

Las imágenes de satélite tienen la ventaja de que abarcan una zona mucho más amplia que las imágenes aéreas, permitiendo realizar estudios territoriales a bajo costo. En la actualidad los satélites nos proporcionan sistemas integrados de datos territoriales (a partir de la radiación electromagnética transformada en información digital) con gran resolución espacial, radiométrica, espectral y gran periodicidad, que hacen de la teledetección un instrumento indispensable para el conocimiento global de la tierra, así como para la detección y cuantificación de los cambios que en ella se producen. El tratamiento digital de imágenes utiliza la información digital (imágenes) procedentes de sensores para la extracción de información específica a los fines requeridos, topográficos y temáticos. Una de sus grandes ventajas es la rapidez de procesamiento de la información digital disponible actualmente para cada proyecto.

Las imágenes digitales, como ya se ha dicho anteriormente, son una transformación (discretización) de las imágenes originales fotográficas (analógicas) en digitales mediante un escáner (ADC), o bien son en sí mismas

digitales si proceden directamente de un barreador multispectral (caso de la teledetección) o cámara digital. En cualquier caso, una imagen digital (Figura 10) se puede considerar de forma genérica como una matriz (bidimensional) discretizada en niveles de grises, ND (nivel digital o valor radiométrico), con una expresión por celda (cada celda/elemento de la matriz se denomina pixel).

El conjunto de la matriz (filas, columnas), así como cada elemento/celda de la misma (pixel), podrán estar, en función del dato capturado, codificados, estructurados y formateados de diversas formas, tanto para los diversos sistemas de almacenamiento y tratamiento informáticos, como para los diversos sistemas de explotación. Los datos a codificar como píxeles de la imagen se realizan en forma binaria, según un número de bits por pixel (profundidad del píxel/radiometría de la imagen). La estructura de los datos vendrá condicionada por su distribución interna (secuencial, jerárquica) y por su orden de grabación, píxeles por cada plano, banda o color. Así, por ejemplo, para una imagen con 1 bit de profundidad por píxel podemos obtener 2 niveles de grises por píxel ($2^1 = 2$ ND). Este caso se conoce como una imagen bitmap en blanco (ND = 1) y negro (ND = 0). A medida que aumentamos la profundidad del píxel iremos teniendo una gama de grises más amplia por píxel. Recordando que el hombre es capaz de observar hasta 200 ND, significaría que para una adecuada representación de una imagen en niveles de grises sería conveniente tener una profundidad de 8 bits/s y por banda ($2^8 = 256$ ND).

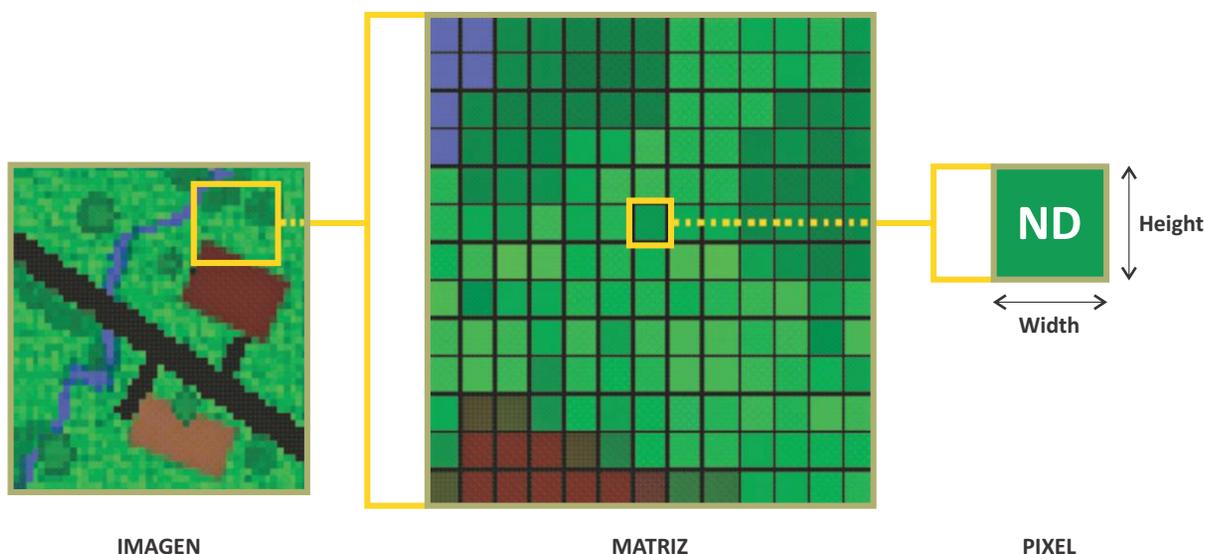


Figura 10. Esquema de una imagen digital. Se trata de una matriz numérica, en la cual cada celda se denomina pixel. Los valores de cada pixel se denominan niveles digitales (ND), cuyo rango de variación depende del número de bits de la imagen. Cualquier software utilizado en procesamiento digital de imágenes satelitales los ND son convertidos en colores para facilitar la interpretación visual de las mismas.

3.b. Resolución del sensor

El concepto de resolución de un sensor podría ser entendido como su capacidad de capturar información en detalle. Cuanto más detallada la información adquirida, mayor es la resolución del sensor que la obtiene. En el caso de las imágenes fotográficas tiene un significado especial. La resolución fotográfica se refiere al número de líneas o más precisamente de pares de líneas que pueden ser grabados en un film o un papel. En teledetección el término es mucho más amplio y tiene distintos factores involucrados, la resolución de un sensor depende de todos sus componentes, por ejemplo una mejora en la lente no implica necesariamente una mejora en la resolución sino se la

acompaña con una mejor resolución del conversor análogo-digital o las condiciones de exposición, podemos así hablar de una resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal. A continuación se explican cada una de ellas:

> **Resolución espacial:** Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen (Figura 11). Está determinada por el tamaño del pixel medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la tierra, el ángulo de visión, velocidad de barrido y las características ópticas del mismo. Por ejemplo las imágenes Landsat TM tienen una resolución espacial de 30 x 30 m de las bandas 1 a 5 y 7 y de 120x120 m en la 6 (térmica).

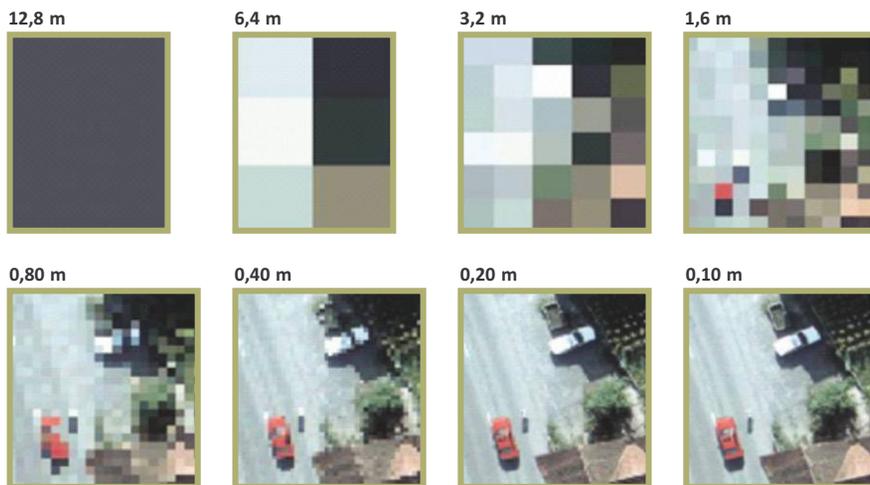
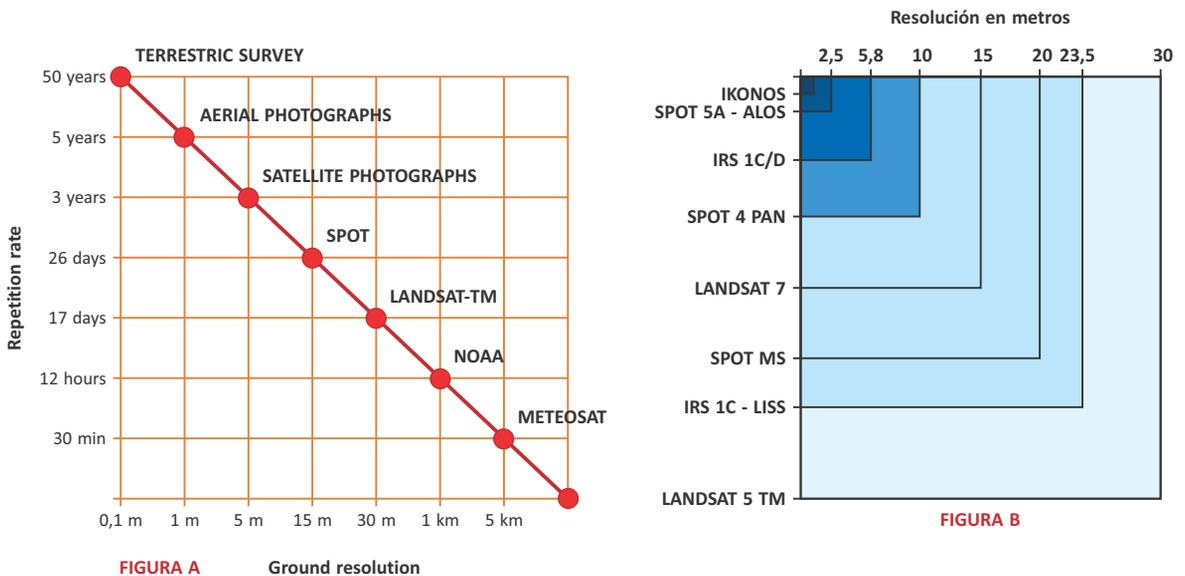


Figura 11. Resolución espacial de un sensor. La resolución espacial de un sensor es generalmente inversamente proporcional a la resolución temporal o tiempo de revisita (Figura A). Diagrama comparativo del tamaño de píxel de diferentes sensores satelitales (Figura B). Análisis comparativo de la capacidad de detectar información detallada duplicando sucesivamente el tamaño de píxel desde 12,8 m hasta 0,10 m (Figura C).

> **Resolución temporal:** Es la frecuencia de pasadas por una misma área. Esto significa cada cuanto tiempo pasa el satélite por el mismo sector de la tierra (tiempo de revisita). Esto depende fundamentalmente de las características de la órbita. Los datos de Landsat MSS vienen siendo colectados y almacenados regularmente desde 1972. El ciclo de repetición de Landsat-1 hasta Landsat -3 es de 17 días, desde el lanzamiento de Landsat 4 en 1984 el ciclo de repetición se redujo a 15 días para MSS y TM. SPOT permite un ciclo de 3 días usando el máximo ángulo de deflección del espejo o 26 días en un ciclo normal.

> **Resolución espectral:** Es el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar el sensor. Por ejemplo SPOT tiene una resolución

espectral de 3, Landsat de 7. Los nuevos sensores, llamados hiperespectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy angosto (unos pocos nm) para poder separar en forma bastante precisa distintos objetos por su radiación. Se pueden distinguir características lineales inferiores a la resolución nominal del pixel, esto se debe a que el pixel es un promedio de las radiaciones recibidas en esa área, por ej., 30 x 30 m, pero si el contraste es suficientemente alto se puede distinguir como una ruta cruza un campo claro o un desierto. Siempre es conveniente que las bandas estén ubicadas en un sector coherente (ventanas atmosféricas) del espectro y de acuerdo al objetivo del sensor. Mientras más angostas sean las bandas es más conveniente, ya que sino lo que se tiene es un promedio de todas las radiaciones en ese rango.

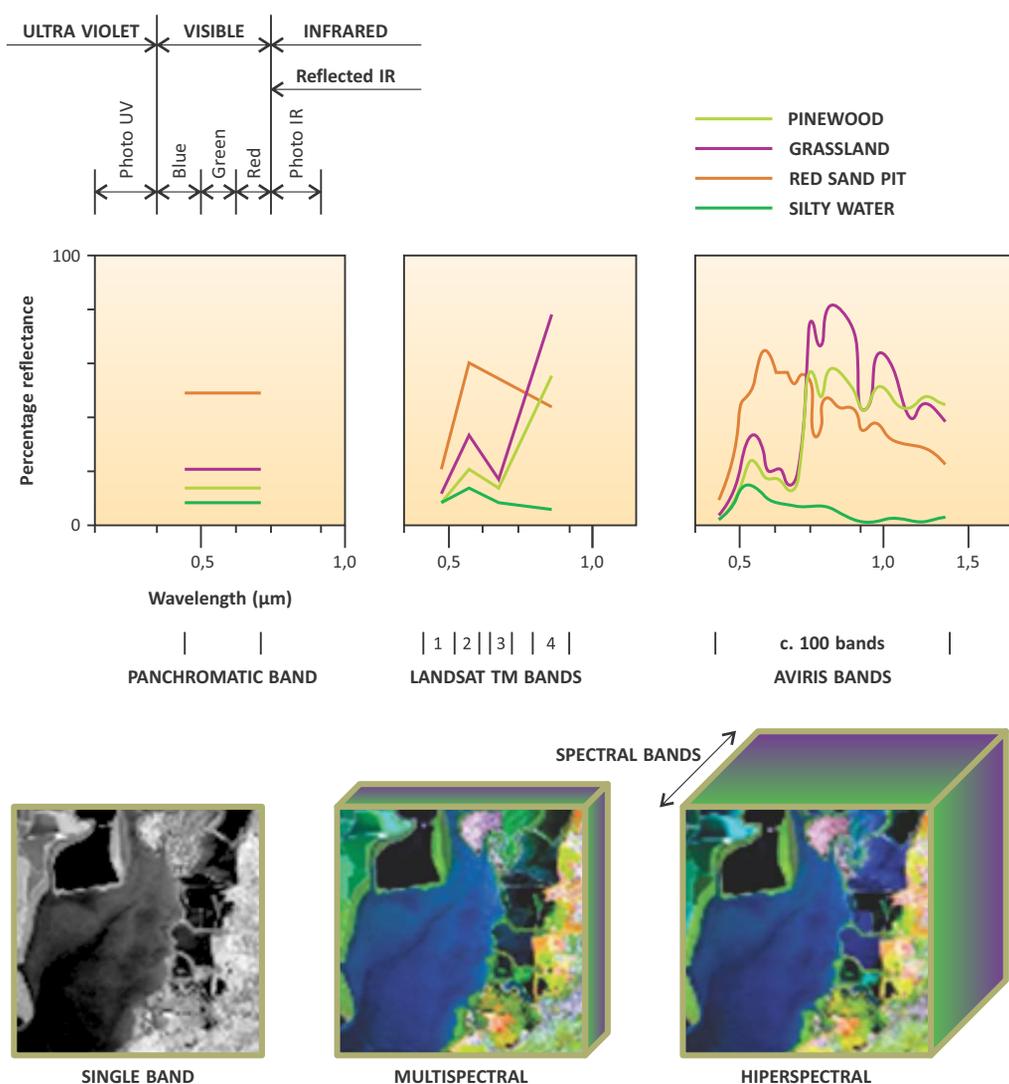


Figura 12. Resolución espectral de un sensor. Comparación de la información espectral obtenida de cuatro pixeles (un bosque de pinos, un pastizal, una cañada de arena roja y un pantano) a partir de un sensor pancromático (una sola banda), un sensor multiespectral (4 bandas en visible + infrarrojo cercano) y un sensor hiperespectral (100 bandas en visible + infrarrojo cercano).

> **Resolución radiométrica:** Se la llama a veces también resolución dinámica, y se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Esto depende del conversor analógico digital usado. La imagen captada por el sensor es analógica y por ende continua, pero las computadoras trabajan con elementos discretos, bytes y bits por lo que esa señal es dividida en una cierta cantidad de niveles de gris, siempre múltiplos de 2, ya que un bit sólo puede almacenar 2 valores 0 y 1. Así por ejemplo Landsat MSS tiene una resolución espectral de $2^6 = 64$ niveles de gris

en el canal 6, y Landsat MSS en las bandas 4 a 7 de $2^7 = 128$ niveles de gris, mientras que en Landsat TM es de $2^8 = 256$. Así, el sensor TM permite distinguir mejor las pequeñas diferencias de radiación. Si se tiene en cuenta que el ojo humano difícilmente pueda distinguir más de 64 niveles de gris y 200 tonalidades, podría parecer superfluo contar con 256 niveles de gris y 16 millones de tonalidades para una imagen color. Sin embargo, el procesamiento digital de imágenes satelitales utiliza procesos numéricos que van mucho más allá de la simple visualización, como por ejemplo la clasificación digital. ☑

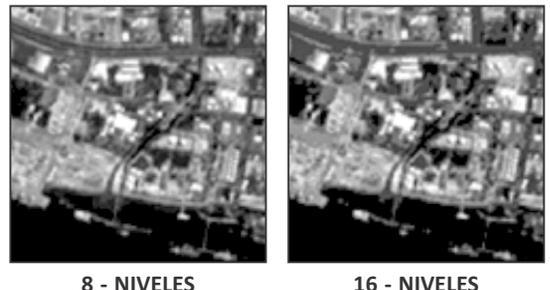
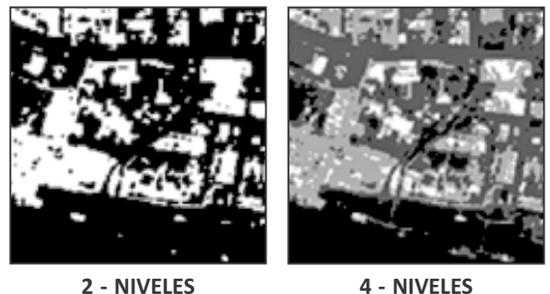
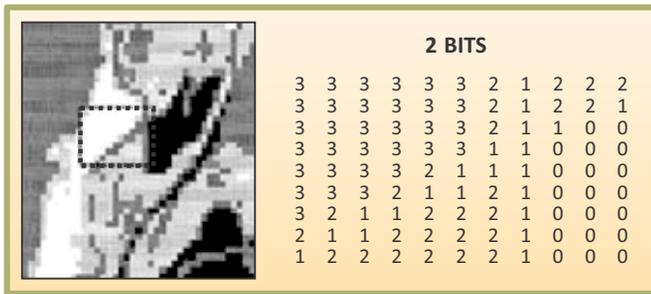


FIGURA A

FIGURA B

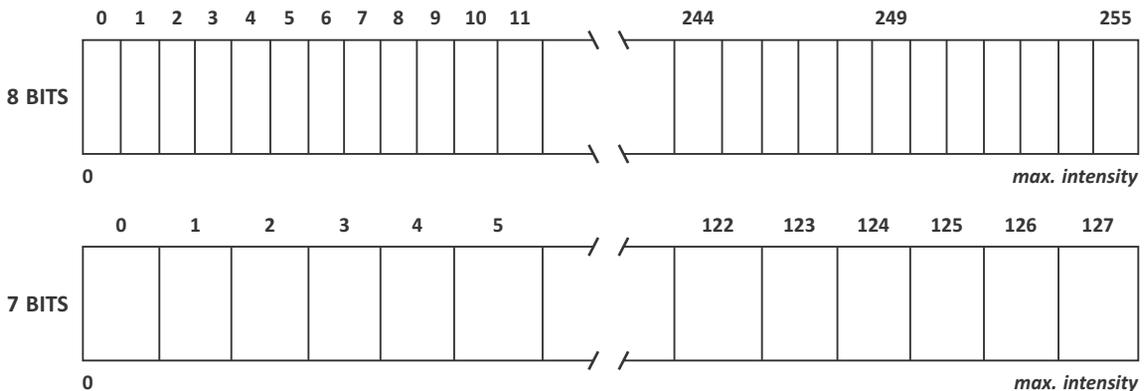


FIGURA C

Figura 13. Resolución radiométrica de un sensor. Comparación del aspecto visual y del rango de niveles digitales (ND) entre una imagen de 2 bits (ND varía entre 0 y 3) y otra de 4 bits (ND varía entre 0 y 15) del mismo sitio geográfico (Figura A). Comparación visual del mismo sitio (Figura B) con sensores de 1 bit (2 niveles de gris), 2 bits (4 niveles de gris), 3 bits (8 niveles de gris) y 4 bits (16 niveles de gris). Esquema comparativo del rango de ND de un sensor de 2^8 bits vs otro de 2^7 bits, simulando dos reglas de igual tamaño total pero diferente densidad de graduación (Figura C).

4. COMPARACIÓN DE SENSORES SATELITALES

En esta sección solo se presentaran figuras comparativas de las resoluciones de los principales sensores satelitales, algunos de los cuales se encuentran actualmente sin registrar información y/o han sido reemplazados por

nuevos sensores montados en nuevas misiones. Sin embargo, de los diferentes sensores que no se encuentran actualmente registrando información es posible obtener información histórica muy valiosa para estudios multi-temporales (todas las misiones Landsat por ejemplo). ☑

Plataforma Sensor Lanzam. Año	Bandas Medio Infrarrojo (μm)	Bandas Infrarrojo Termal (μm)	Rango Bandas PAN (μm)	Imagen Tamaño Celda	Nominal Revisit Interval*
Ikonos 2 VNIR 1999	None	None	0.45 - 0.90 B, G, R, NIR	1 m	11 days (2.9 days ¹)
Terra (EOS-AM-1) - ASTER 1999	1.60 - 1.70 2.145 - 2.185 2.185 - 2.225 2.235 - 2.285 2.295 - 2.365 2.36 - 2.43	8.125 - 8.475 8.475 - 8.825 8.925 - 9.275 10.25 - 10.95 10.95 - 11.65	None	x	16 days
SPOT 4 HRVIR (XS) 1999	1.58 - 1.75	None	0.61 - 0.68 R	10 m	26 days (5 days ¹)
SPOT 1, 2, 3 HRV (XS) 1986	None	None	0.51 - 0.73 G, R	10 m	26 days (5 days ¹)
IRS - 1C, 1D LISS III 1995	1.55 - 1.70	None	0.50 - 0.75 G, R	5.8 m	24 days (5 days Pan ¹)
Landsat 7 ETM+ 1999	1.55 - 1.75 2.09 - 2.35	10.40 - 12.50	0.52 - 0.90 G, R, NIR	15 m	16 days
Landsat 4, 5 TM 1982	1.55 - 1.75 2.08 - 2.35	10.40 - 12.50	None	x	16 days
IRS - 1A, 1B LISS I, II 1988	None	None	None	x	22 days
Landsat 4, 5 MSS 1982	None	None	None	x	16 days
IRS - 1C, 1D WIFS 1995	None	None	None	x	5 days

*: Satélite individual con vista nadir en el Ecuador. 1: Con capacidad "pointing".
Usted puede importar imágenes desde cualquier de estos sensores al formato de Archivo de Proyectos de TNTmips usando el proceso Importar/Exportar.
Cada banda de imagen es guardada como un objeto raster.

Figura 14. Tabla comparativa de las resoluciones espacial, espectral y temporal de los principales sensores utilizados para el estudio de recursos naturales. Siglas: B (blue), G (green), R (red), NIR (near infrared).

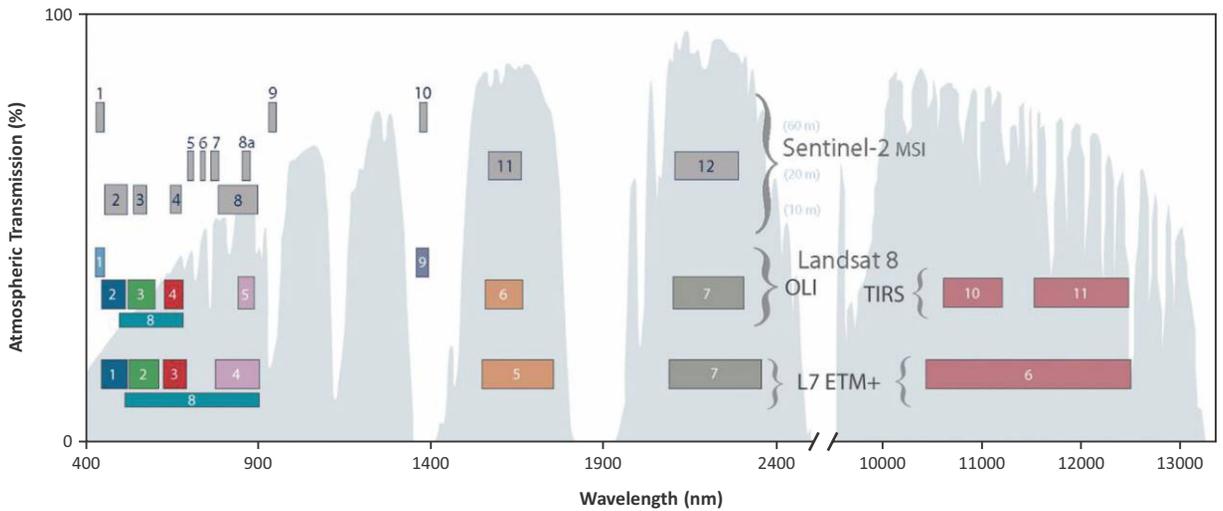
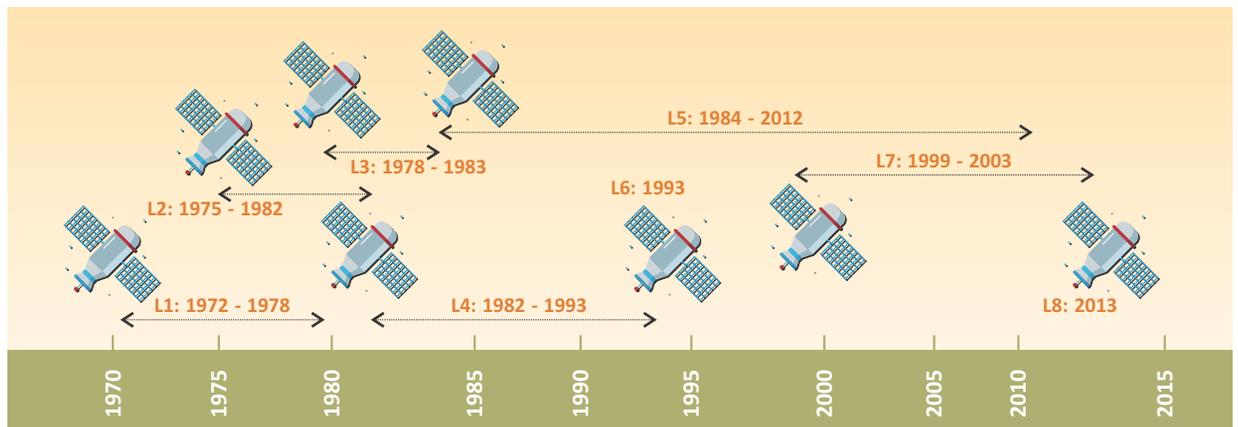


Figura 15. Comparación de la resolución espectral de los sensores montados en las misiones Landsat 7 (ETM+), Landsat 8 (OLI y TIRS) y Sentinel-2 MSI. El ancho de los rectángulos es equivalente al ancho de banda (límite espectral inferior y superior de la región espectral de la que obtiene información). Note que en Landsat 8 y Sentinel 2 no solo hay bandas en regiones espectrales de ventanas atmosféricas (fondo gris), sino también bandas para estudios atmosféricos en regiones espectrales de opacidad atmosférica (fondo blanco).



	Bandas	Longitud de Onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

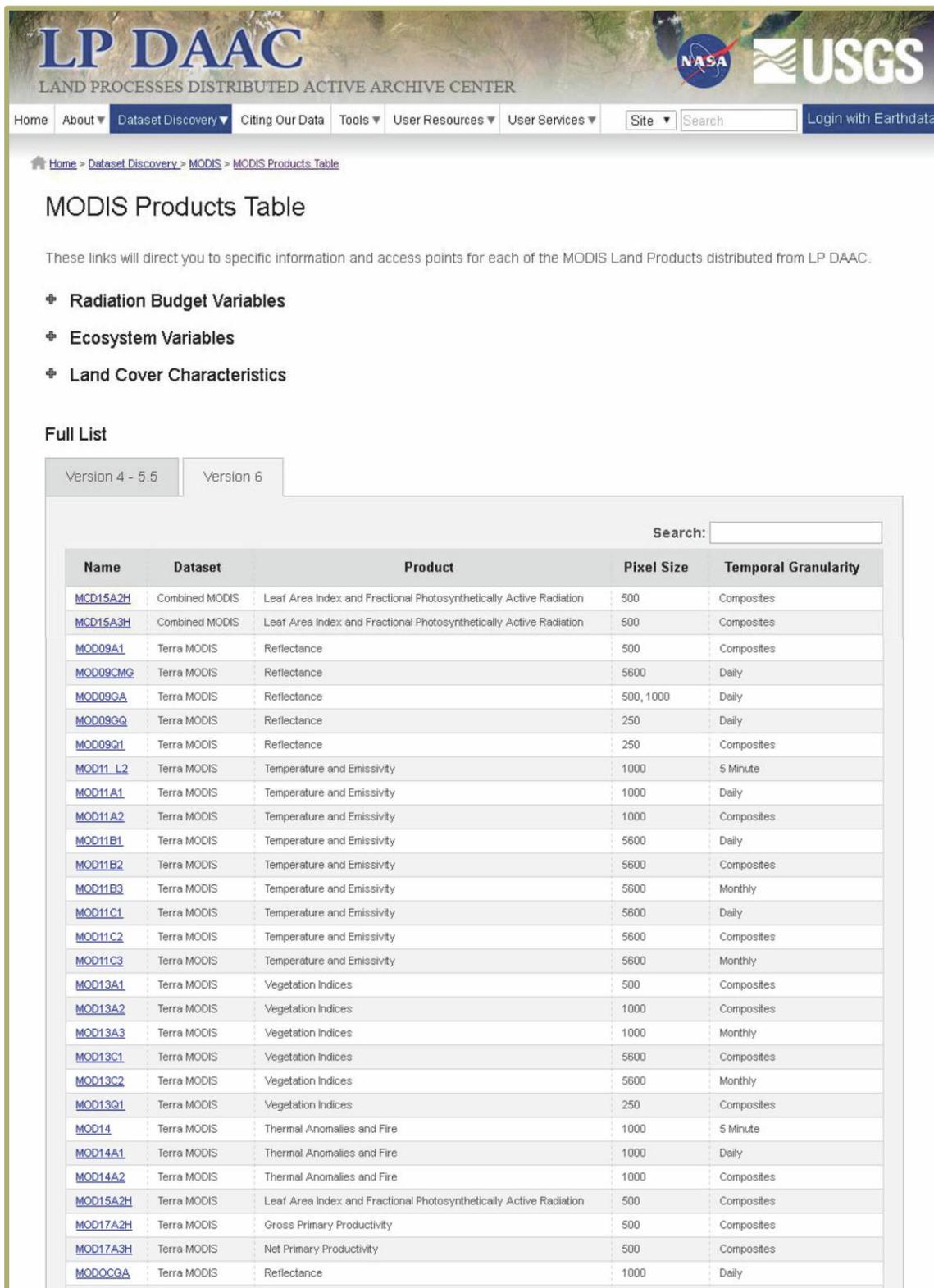
(USGS. 2013)

Figura 16. Las misiones Landsat. Historia de las misiones Landsat (L) desde L1 hasta L8, incluyendo el lanzamiento fallido de L6 en 1993 (Figura Superior). Descripción detallada de la resolución espectral y espacial de los sensores OLI y TIRS de la misión L8 (Tabla Inferior).

Primary Use	Band	Bandwidth ¹
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670
	2	841 - 876
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479
	4	545 - 565
	5	1230 - 1250
	6	1628 - 1652
	7	2105 - 2155
Ocean Color Phytoplankton Biogeochemistry	8	405 - 420
	9	438 - 448
	10	483 - 493
	11	526 - 536
	12	546 - 556
	13	662 - 672
	14	673 - 683
	15	743 - 753
Atmospheric Water Vapor	16	862 - 877
	17	890 - 920
	18	931 - 941
Surface/Cloud Temperature	19	915 - 965
	20	3660 - 3840
	21	3929 - 3989
Atmospheric Temperature	22	3929 - 3989
	23	4020 - 4080
Cirrus Clouds Water Vapor	24	4433 - 4498
	25	4482 - 4549
Cloud Properties	26	1360 - 1390
	27	6535 - 6895
	28	7175 - 7475
Ozone	29	8400 - 8700
	30	9580 - 9880
Surface/Cloud Temperature	31	10780 - 11280
	32	11770 - 12270
Cloud Top Altitude	33	13185 - 13485
	34	13485 - 13785
	35	13785 - 14085
	36	14085 - 14385

1: Bands 1 to 19 are in nm - Bands 20 to 35 are in μm .

Figura 17. Bandas espectrales del sensor MODIS. Período de revisita diario. Resolución espacial, bandas 1 y 2 (250 m), bandas 3 a 7 (500 m) y bandas 8 a 36 (1000 m). A bordo del satélite TERRA (AM) y a bordo del satélite AQUA (PM).



LP DAAC
LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER

Home About Dataset Discovery Citing Our Data Tools User Resources User Services Site Search Login with Earthdata

Home > Dataset Discovery > MODIS > MODIS Products Table

MODIS Products Table

These links will direct you to specific information and access points for each of the MODIS Land Products distributed from LP DAAC.

- Radiation Budget Variables
- Ecosystem Variables
- Land Cover Characteristics

Full List

Version 4 - 5.5 Version 6

Search:

Name	Dataset	Product	Pixel Size	Temporal Granularity
MCD15A2H	Combined MODIS	Leaf Area Index and Fractional Photosynthetically Active Radiation	500	Composites
MCD15A3H	Combined MODIS	Leaf Area Index and Fractional Photosynthetically Active Radiation	500	Composites
MOD09A1	Terra MODIS	Reflectance	500	Composites
MOD09CMG	Terra MODIS	Reflectance	5600	Daily
MOD09GA	Terra MODIS	Reflectance	500, 1000	Daily
MOD09GG	Terra MODIS	Reflectance	250	Daily
MOD09Q1	Terra MODIS	Reflectance	250	Composites
MOD11_L2	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	1000	5 Minute
MOD11A1	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	1000	Daily
MOD11A2	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	1000	Composites
MOD11B1	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	5600	Daily
MOD11B2	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	5600	Composites
MOD11B3	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	5600	Monthly
MOD11C1	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	5600	Daily
MOD11C2	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	5600	Composites
MOD11C3	Terra MODIS	Temperature and Emissivity	5600	Monthly
MOD13A1	Terra MODIS	Vegetation Indices	500	Composites
MOD13A2	Terra MODIS	Vegetation Indices	1000	Composites
MOD13A3	Terra MODIS	Vegetation Indices	1000	Monthly
MOD13C1	Terra MODIS	Vegetation Indices	5600	Composites
MOD13C2	Terra MODIS	Vegetation Indices	5600	Monthly
MOD13Q1	Terra MODIS	Vegetation Indices	250	Composites
MOD14	Terra MODIS	Thermal Anomalies and Fire	1000	5 Minute
MOD14A1	Terra MODIS	Thermal Anomalies and Fire	1000	Daily
MOD14A2	Terra MODIS	Thermal Anomalies and Fire	1000	Composites
MOD15A2H	Terra MODIS	Leaf Area Index and Fractional Photosynthetically Active Radiation	500	Composites
MOD17A2H	Terra MODIS	Gross Primary Productivity	500	Composites
MOD17A3H	Terra MODIS	Net Primary Productivity	500	Composites
MOD0CGA	Terra MODIS	Reflectance	1000	Daily

Figura 18. Productos MODIS accesibles en sitio web oficial:

(https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table).

La tabla contiene la denominación del producto como vínculo para ingresar a descargarlo, la plataforma a la que pertenece el sensor (TERRA o AQUA), una breve descripción del producto, el tamaño de pixel y la resolución temporal con la que se prepara el producto (los compuestos son generalmente de 16 días). Solo se muestra una parte de la tabla.

Geometría		Cámara MMRS	
Resolución Espacial	175 metros en ambas direcciones		
Ancho de Barrido	360 km y unos 5000 km de longitud		
Precisión Geométrica	Mejor que 1 píxel especificada (0.5 píxel deseada)		
Coregistración entre Bandas	< 0.5 píxel		
Coregistración Multitemporal	1 píxel		
Radiometría	Banda 1	480 - 500 nm	Azul verdoso
	Banda 2	540 - 560 nm	Verde
	Banda 3	630 - 690 nm	Rojo
	Banda 4	795 - 835 nm	Infrarrojo cercano (NIR)
Bandas MMRS	Banda 5	1550 - 1700 nm	IR medio de onda corta (SWIR)
Geometría		Cámara HRTC	
Resolución Espacial	35 metros en ambas direcciones		
Ancho Barrido	90 km		
Precisión Geométrica	Mejor que 1 píxel especificada (0.5 píxel deseada)		
Coregistración Multitemporal	1 píxel		
Radiometría			
Banda de la HRTC	Pancromática de 400 a 900 nm		

Figura 19. Descripción de sensores montados en satélites de Argentina. Características resolutivas de la cámara multiespectral MMRS y la cámara pancromática HRTC montadas sobre el satélite SAC-C que con un tiempo de revisita de 16 días orbitó desde fines del 2000 hasta el 2013.

INSTRUMENTOS	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS	RESOLUCIÓN	AGENCIA
Aquarius Radiómetro y Escaterómetro	Salinidad de la superficie de mar	1 Radiómetro en banda L, (1.413 Ghz) y escaterómetro (1.26 Ghz) - Barrido: 390 km	Tres haces: 76 x 94, 84 x 120, 96 x 156 km	NASA
MWR Radiómetro de Microondas	Precipitación, velocidad del viento, concentración de hielos, vapor de agua, agua en nubes	Bandas: 23.8 Ghz Polar. V y 36.5 Ghz polar. H & V Ancho de banda: 0.5 y 1 Ghz Barrido: 380 km	Diescisis haces < 54 km c/u	CONAE
NIRST Cámara Térmica	Incendios, volcanes, temperatura superficie del mar	Bandas: 4, 11 y 12 μ m Barrido instantáneo: 182 km Barrido extendido: 1000 km Apuntamiento: $\pm 30^\circ$	Espacial: 350 m Radiométrica: 1.5 $^\circ$ C Mínima área incendiabile detectable: 200 m ²	CONAE CSA
HSC Cámara de Alta Sensibilidad	Luces urbanas, tormentas eléctricas, cobertura de áreas nevadas, detección de buques	Pancromática: 450 - 700 nm Barrido: 1200 km	200 - 400 metros	CONAE
DCS Sistema Recolector de Datos	Recepción de datos generados por plataformas automáticas distribuidas en tierra	Receptor a bordo 401.55 Mhz	2 contactos por día con un máx. de 200 plataformas	CONAE
ROSA Radio Occultation Sounder for Atmosphere	VARIABLES atmosféricas	Técnicas de radio-ocultación usando señales GPS	Horiz.: 300 km Vert.: 300 m	ASI
CARMEN I ICARE & SODAD	Efectos de la radiación cósmica sobre dispositivos electrónicos, distribución micro-partículas en la órbita	ICARE: 3 detectores de Si, Si/Li SODAD: 4 sensores MOS	I: espectro de 256 canales S: sensible a 0.5 upart a 10 km/seg	CNES
TDP Instrumento Tecnológico	Posición, velocidad y tiempo, determinación de velocidades angulares	Receptor GPS Unidad de referencia inercial	Posición: 20 metros Velocidad: 1 m/seg	CONAE

Figura 19 (continuación). Descripción de instrumentos a bordo del satélite SAC-D, entre los que se destacan para fines de estudios de cubiertas terrestres la cámara pancromática HSC y la cámara infrarroja NIRST.

5. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES

5.a. Introducción

El proceso de adquisición de una imagen digital difiere sustancialmente del empleado en una fotografía aérea. En cualquier sistema fotográfico la energía procedente de los objetos se registra sobre una superficie sensible a la luz. Esta puede componerse de una o varias capas formando respectivamente una película pancromática o en color. En el caso de los equipos ópticos electrónicos, no existe esta superficie sólida de grabación, ya que el sensor explora secuencialmente la superficie terrestre adquiriendo, a intervalos regulares, la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados.

La cadencia con la que el sensor realiza ese muestreo de la superficie terrestre define la resolución espacial del mismo. Así, el sensor detecta la radiancia media de una parcela del terreno equivalente al tamaño del píxel (unidad visual mas pequeña que aparece en la imagen), luego este valor medio se traduce por el sensor a un valor numérico a partir del cual se realiza el tratamiento digital de imágenes. En consecuencia, cada píxel de la imagen viene definido por un número entero, traducción de la radiancia recibida por el sensor para una determinada parcela de la superficie terrestre y en una determinada banda del espectro. Este valor numérico se denomina nivel digital (ND). El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que puede fácilmente traducirse a una intensidad visual o nivel de gris, mediante cualquier convertidor digital-analógico (un

monitor de computadora por ejemplo). Los ND forman imágenes cuando son desplegados sobre un monitor de PC con un software apropiado, o en una salida por impresora. En las imágenes obtenidas por los sensores remotos, cada ND representa un área de la tierra en un lugar específico.

La localización de un píxel dentro de un archivo o en una imagen desplegada o impresa es expresada mediante un sistema de coordenadas en dos dimensiones. Una imagen está organizada como una grilla de filas y columnas (Figura 20). Cada lugar sobre esta grilla esta expresada como un par de coordenadas, genéricamente referida como "x" e "y". Las coordenadas "x" especifican la columna en la grilla y la coordenada "y" especifica la fila. Los datos organizados de esta forma, son conocidos como datos "Raster". Las imágenes pueden estar

formadas por varias bandas de información, cada banda es un set de datos de una porción específica del espectro electromagnético (rojo-verde-azul-infrarrojo cercano-infrarrojo medio-termal-etc.), o alguna otra información definida por el usuario creada por combinación o mejoras de las bandas originales o creando nuevas bandas desde otras fuentes. Se trata de una matriz numérica de tres dimensiones las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. Se trata entonces, de una matriz, el origen de coordenadas se sitúa en la esquina-superior-izquierda (línea 1 columna 1), esto es debido a la secuencia de adquisición de imágenes, de Norte a Sur de acuerdo a la traza del satélite. La tercera dimensión (z) corresponde a la resolución espectral del sensor (Figura 20).

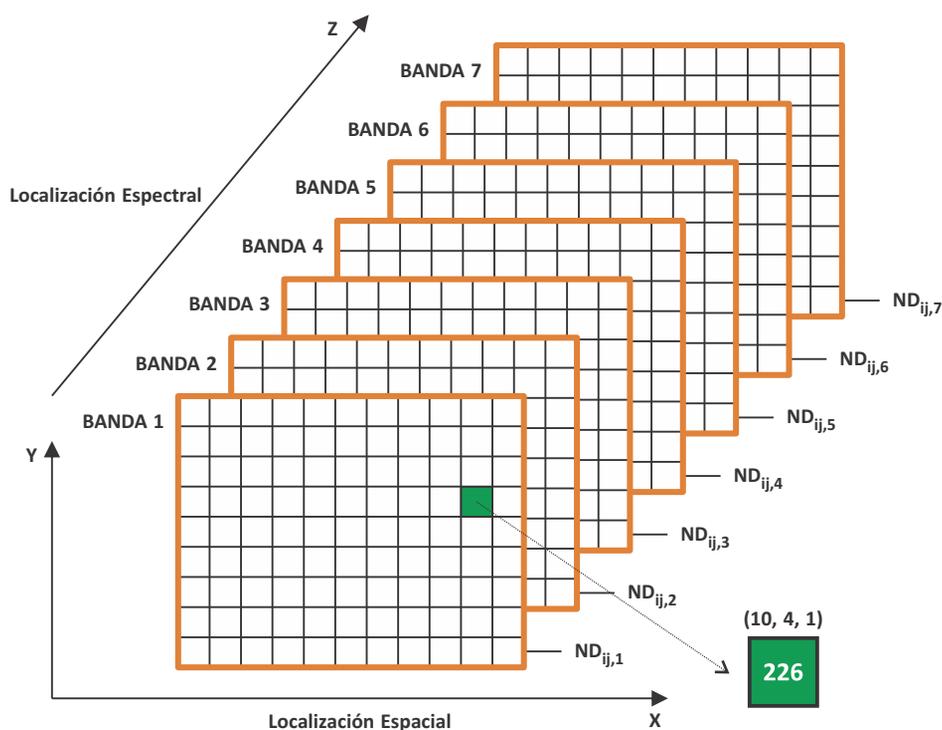


Figura 20. Esquema de un archivo raster representativo de una imagen satelital. Las coordenadas X Y corresponden a la localización espacial de un nivel digital (ND). La coordenada Z a la localización espectral de un ND. La resolución espectral de la imagen de este ejemplo es 7. Se hizo zoom sobre un píxel localizado en la columna 10 ($X=10$), en la fila 4 ($Y=4$) y en la banda 1 ($Z=1$) cuyo ND para esa banda es 226.

Teniendo presente ese carácter matricial de cualquier imagen numérica, son más fácilmente comprensibles las posteriores transformaciones aplicadas sobre ella. Estas son en muchos casos operaciones estadísticas comunes a otras matrices numéricas. Por Ej., en una imagen digital podemos calcular medidas de tendencia central y dispersión (media y desviación típica en cada una de las bandas). También se puede cambiar su orientación

geométrica (rotación de la matriz), realizar combinaciones aritméticas entre bandas, sintetizar varias bandas reduciendo la información redundante (componentes principales) o discriminar grupos de ND homogéneos dentro de la matriz (clasificación).

El formato de grabación indica la organización de los ND que forman la imagen dentro del medio de almacenamiento, cintas magnética, CD-ROM, etc., en este

sentido, conviene considerar la codificación aplicada y la organización lógica de los datos. Los formatos de imagen más extendidos son: TIFF, PCX, GIF, EPS, PSD, BMP, IMG, JPEG, MPEG, etcétera. Los ND de la imagen se graban en código binario (un BIT 0, 1), la mayor parte de los sensores emplean grupos de 8 bits para almacenar el ND correspondiente a cada píxel. En definitiva, cada píxel se define por un Byte, lo que equivale a un rango de 256 niveles ($2^8 = 0$ a 255). Las imágenes digitales en un medio magnético, se organizan en una serie de ficheros (files), cada uno de los cuales se descompone en registros (records). Normalmente cada imagen incluye un fichero de cabecera (header file), en donde se almacenan los metadatos (formato con que están grabados los ND que la componen, condiciones en que se adquirió la imagen como tipo de sensor, localización de la escena, día, elevación y azimut solar, etc., y el tipo de correcciones aplicadas por la estación receptora).

La distribución de los ficheros en un medio magnético de almacenaje está en estrecha relación con el formato en que se graban los ND de la imagen. Los tres formatos más habituales son:

> **Bandas secuenciales (BSQ):** Implica que los ND de cada banda se disponen uno a continuación del otro

hasta completar todos los píxeles de una banda. Tras ellos se sitúan los ND de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar todas las bandas espectrales de la imagen. Normalmente, entre banda y banda, se inserta un fichero de cola y otro de cabecera, con el propósito de identificar la región del espectro sobre la que se está recogiendo información.

> **Bandas intercaladas por líneas (BIL):** En este caso los ND se organizan por líneas en vez de por bandas, disponiéndose consecutivamente los correspondientes a todas las bandas, por cada línea, antes de comenzar la línea siguiente. En definitiva tras los ND de la línea 1, banda 1, se sitúan los correspondientes a los de la línea 1, banda 2, para luego continuar los de la banda 3, 4, etc., hasta completar el número total de bandas. Tras la primera línea de la última banda se sitúa la segunda línea de la banda uno, de la banda 2, y así sucesivamente.

> **Bandas intercaladas por píxel (BIP):** En lugar de alternarse los ND en cada línea, se alternan en cada píxel, así tras el correspondiente al píxel de la línea 1, columna 1, banda 1, aparece el correspondiente a la línea 1, columna 1, banda 2, seguido del adquirido para la línea 1, columna 1, banda 3, etc.

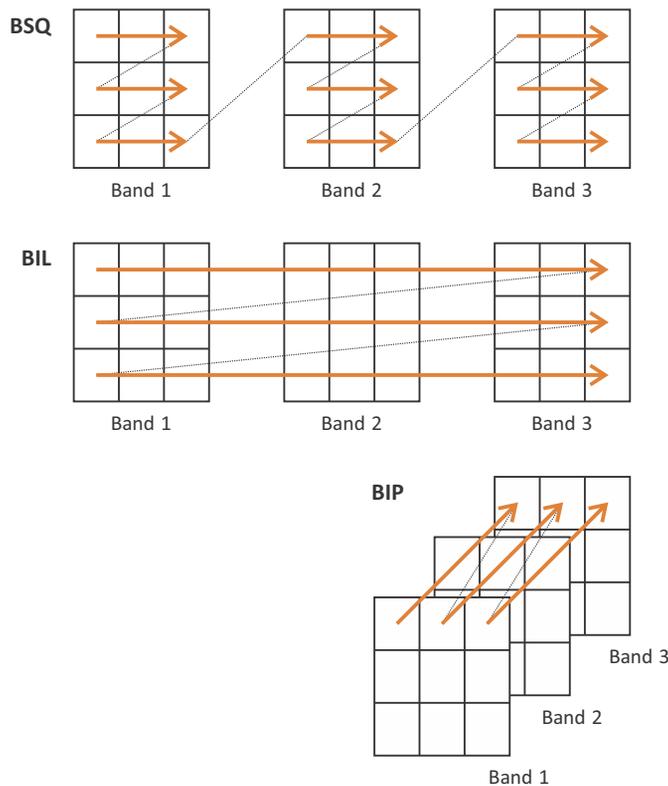


Figura 21. Esquema para representar los tipos de ordenamiento de datos raster (imágenes satelitales) en la grabación de los archivos. Bandas secuenciales (BSQ), bandas intercaladas por línea (BIL) y bandas intercaladas por píxel (BIP).

5.b. Visualización de imágenes satelitales

Para la visualización de los datos de teledetección es mejor tener una representación en colores ya que el ojo humano capta mejor el color que los niveles de gris. El color es una función de la longitud de onda de la luz visible dentro del espectro desde el rojo como la mayor longitud de onda pasando por el naranja, amarillo, verde, azul y violeta como la más corta. El blanco y el gris se pueden obtener mezclando todos los otros colores, mientras que los demás colores se pueden obtener mezclando rojo, azul y verde (RGB, del inglés Red, Green,

Blue). Este proceso llamado mezcla de colores aditiva (Figura 22) es el principio de funcionamiento del tubo de rayos catódicos (CRT en inglés) para televisión y computadoras. Existe otro método que es la mezcla de colores sustractiva donde los colores complementarios de rojo, verde y azul son cian, magenta y amarillo, que también se pueden combinar para tener la paleta completa de colores incluyendo el negro. Este es el principio de funcionamiento de casi todas las impresoras color y plotters de inyección de tinta, se lo llama sistema YMC. Muchas veces el negro se obtiene con un chorro aparte.

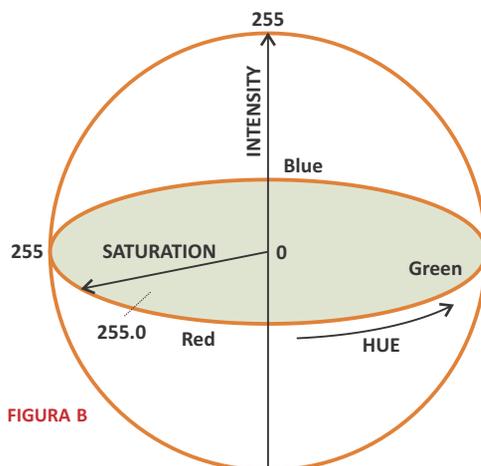
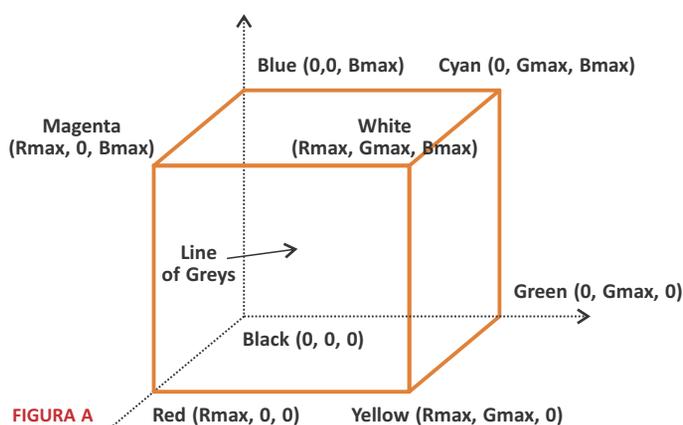


FIGURA A

FIGURA B

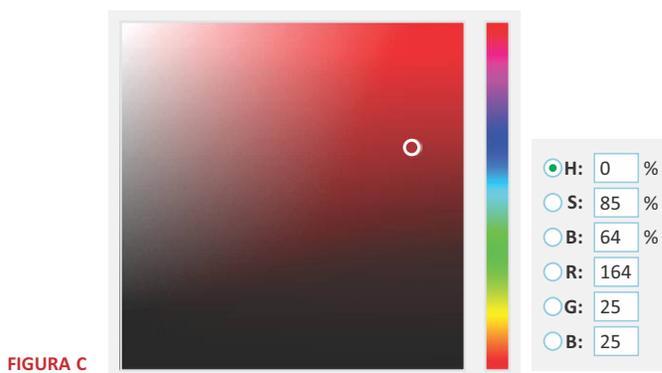


FIGURA C

Figura 22. Definición del color de los píxeles de una imagen satelital colocando las bandas en los canales rojo (red = R), verde (green = G) y azul (blue = B), denominado método de visualización RGB simbolizado como un cubo donde los canales R, G y B son los ejes de un sistema tridimensional (Figura A). Otra forma de definir el color de un píxel es mediante los parámetros de intensidad, tono y saturación (IHS), simbolizado como una esfera donde la altura es la intensidad I, el perímetro de la circunferencia es el tono H y el diámetro de la circunferencia es la saturación S (Figura B). Ambos sistemas para definir el color son compatibles y se pueden definir numéricamente (Figura C).

Otra forma de definir el color es usando los parámetros de intensidad, tono y saturación (IHS en inglés, de Intensity, Hue y Saturation). En el procesamiento digital de imágenes es factible hacer la conversión RGB a IHS y viceversa (Figura 22), lo cual es muy útil para la diferenciación de pequeñas variaciones de tonos que a veces es

casi imposible distinguir en RGB y es fácilmente separable en IHS y que no se puede hacer con otros métodos, como por ejemplo distinguir cultivos con una reflexión espectral muy similar. Los datos de sensores remotos son almacenados normalmente en distintas bandas, y para verlos en colores se hace una combinación de tres

bandas, la combinación de cualquiera de estas bandas se lo llama imagen de color compuesta. Una composición de bandas en las cuales se asigna a los cañones rojo, verde y azul del CRT las longitudes de onda correspondiente al código de colores (o sea rojo en rojo, verde en verde y azul en azul) nos da una imagen en color natural o colores verdaderos, usando diferentes bandas o códigos de colores obtenemos imágenes en falso color.

El software ERDAS Imagine ofrece un visualizador de imágenes satelitales con herramientas muy útiles para extraer información rápidamente (Figura 23). Lo primero a definir al abrir una imagen satelital para su visualización es el orden de las bandas espectrales en los canales RGB. Eso depende del sensor que generó la imagen y los objetivos del estudio. Por ejemplo, en el caso de una imagen Landsat TM para observar vegetación se recomienda la combinación en falso color 4 (infrarrojo cercano) - 3 (rojo) - 2 (verde) en los canales RGB. Con esa combinación de bandas los lugares con

alta cobertura vegetal activa se observarán de color rojo.

Otra decisión importante para visualizar una imagen satelital es la actualización de histograma. Generalmente, en una escena satelital (por ejemplo Landsat TM de 185 x 185 km) los valores que toman los ND en cualquiera de las bandas es menor al rango posible (0 a 255). Por lo tanto, existe la posibilidad de generar valores de visualización que si aprovechen todo el rango de variación que brinda la resolución radiométrica de la imagen, y así mejorar el contraste de visualización (Figura 24).

Otras dos herramientas muy importantes que brinda ERDAS en el módulo de visualización de imágenes satelitales son la posibilidad de medir distancias, rumbos y superficies; y la posibilidad de dibujar archivos vectoriales (puntos, líneas y polígonos - Figura 25). Ambas herramientas son muy útiles para el diagnóstico forrajero de campos ganaderos.

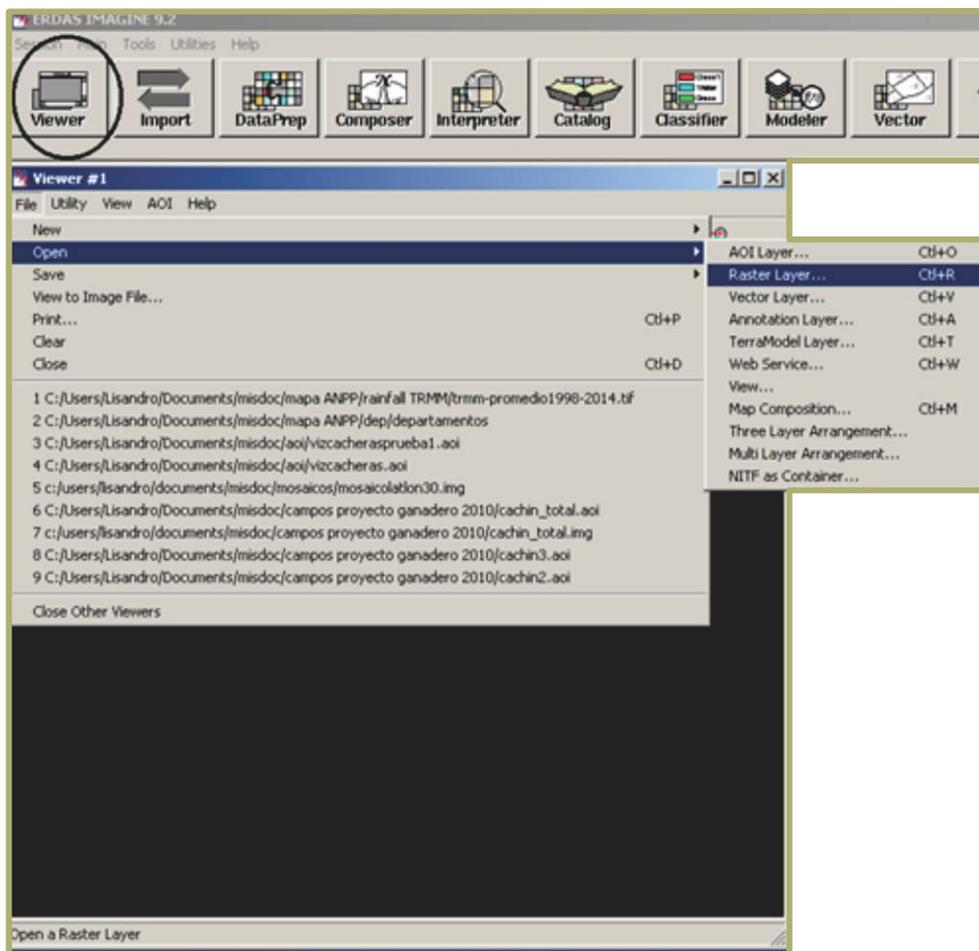


Figura 23. Proceso de apertura de una imagen satelital Landsat TM (archivo raster) en un "viewer" de ERDAS Imagine 9.2 para su visualización.

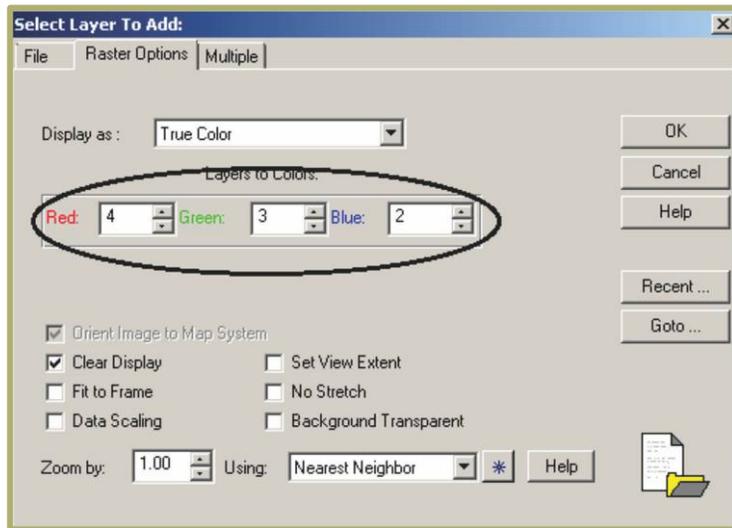


Figura 23 (continuación). Selección de las bandas 4-3-2 (Falso color) en los canales RGB para visualizar vegetación. La flecha amarilla indica la opción de no ecualizar el histograma (no stretch).

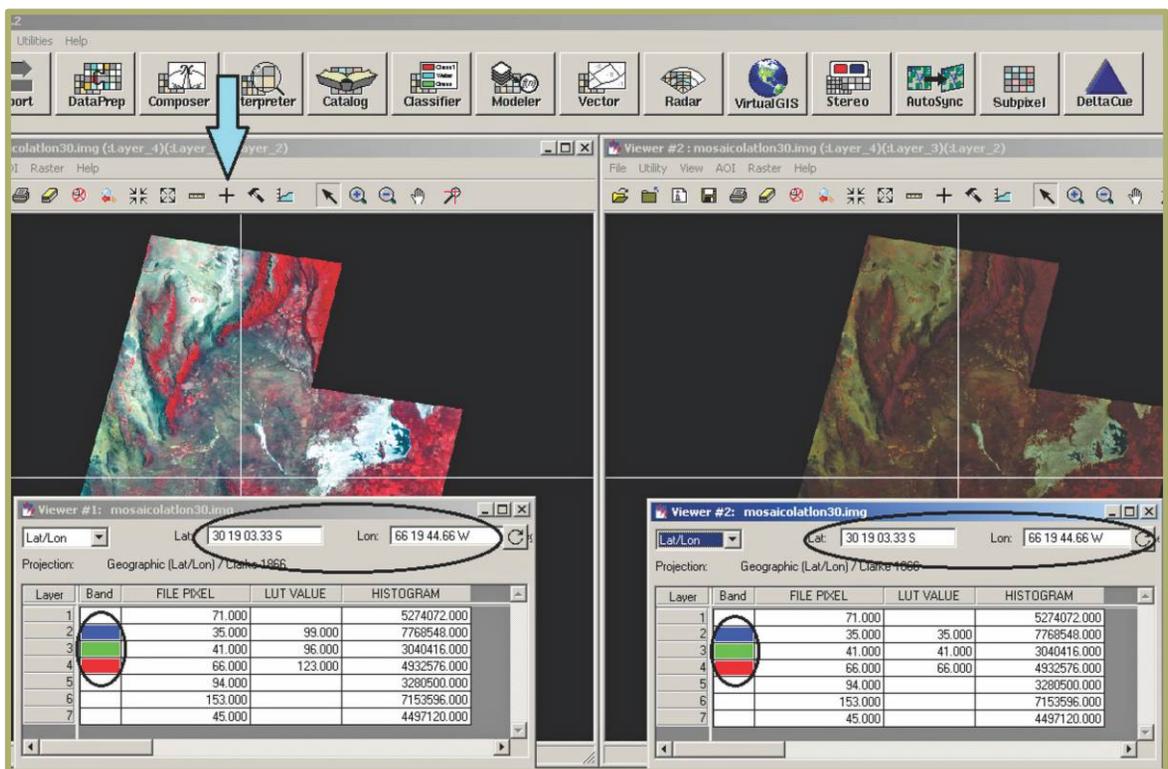


Figura 24. Comparación de una misma imagen Landsat TM con (izquierda) y sin (derecha) ecualización de histograma. Luego, la flecha celeste marca la posibilidad de utilizar la herramienta “+” que permite obtener los niveles digitales (ND = FILE PIXEL en la tabla) y los niveles visuales (LUT VALUE en la tabla) de un sitio de localización geográfica precisa (ver latitud S y longitud W en grados, minutos y segundos señalados con una elipse). Obsérvese en ambas tablas, que con rectángulos de colores se marcan que las bandas visualizadas son la 4, 3 y 2 en los canales RGB. Luego, en la tabla desplegada para la imagen con histograma ecualizado (izquierda) el ND de las tres bandas visualizadas es diferente al LUT VALUE. Contrariamente, en la imagen sin histograma ecualizado (derecha) los ND y LUT VALUE de las 3 bandas visualizadas son idénticos. Finalmente, la última columna de la tabla (HISTOGRAM) indica la frecuencia con la que el ND de cada una de las 7 bandas se repite en toda la imagen.

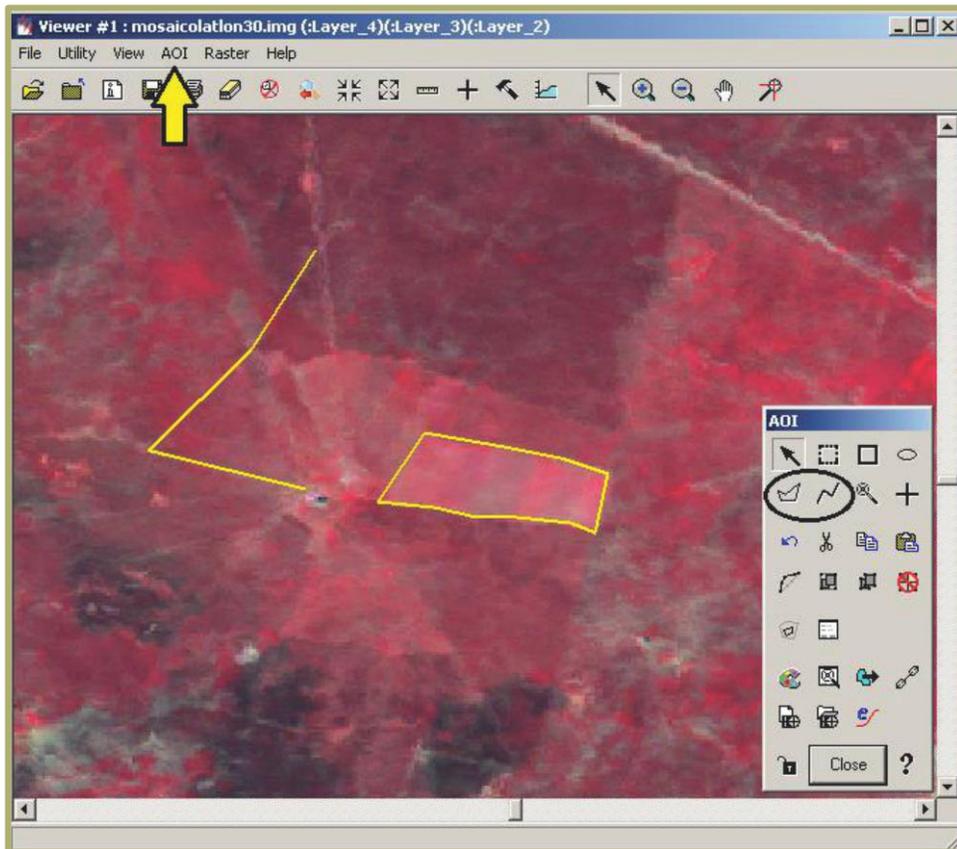


Figura 25. Uso de las herramientas para generar archivos vectoriales (AOI) en ERDAS. Dentro del módulo de visualización (viewer) se abre la opción "AOI" (indicado con flecha amarilla) con la cual se despliega el sub-menú que se observa en el extremo inferior derecho de la figura. Allí se destacan con una elipse los dos íconos que permiten dibujar un polígono o una línea sobre la imagen. Luego dichos dibujos pueden ser guardados como archivos vectoriales (xxxx.aoi).

5.c. Clasificación de imágenes satelitales

Uno de los usos más importantes de la teledetección es la generación de cartografía temática como producto final. Así, el proceso de la clasificación es la herramienta más utilizada para tal fin. El objetivo de una clasificación consiste en agrupar los píxeles que posean una misma característica. Generalmente la característica tomada es el nivel digital (ND) de los mismos, que se corresponderá a un tipo de cobertura del terreno. Se pasa de tener unos ND continuos medidos por los sensores a una escala nominal o categórica de manera que cada píxel pertenece a una categoría definida previamente. El ND de un píxel clasificado es, en definitiva, el identificador de la clase o categoría en la que se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de cubiertas (variable nominal o categórica) o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). Un ejemplo del primer tipo sería una clasificación de distintos tipos de cubierta vegetal, en cambio uno del segundo tipo sería un intento de clasificar distintos niveles de daño producidos por un incendio (Figura 26).

El proceso de clasificación incluye un conjunto de etapas sucesivas que se retroalimentan (Figura 27).

Tradicionalmente se han dividido los métodos de clasificación en dos grupos: supervisado y no supervisado, para los cuales las etapas del proceso son sustancialmente diferentes, y la base conceptual distinta. Las principales diferencias entre la clasificación supervisada y no supervisada son:

> La clasificación supervisada cuenta inicialmente con una etapa de entrenamiento que se basa en la localización en terreno de clases informacionales que luego serán digitalizadas en pantalla sobre la imagen satelital. La clasificación no supervisada carece de esta etapa, inicialmente solo se visualiza la imagen en pantalla, y de acuerdo a la heterogeneidad espacial se define el número de clases.

> Luego, la clasificación supervisada tiene una segunda etapa de análisis espectral de las áreas de entrenamiento, que incluye analizar las estadísticas centrales y de dispersión de los niveles digitales (ND) para todas las bandas de cada área de entrenamiento. Esta etapa para

la clasificación supervisada es insumo para la siguiente etapa (asignación o clasificación propiamente dicha), en cambio en la clasificación no supervisada es resultado de la etapa de asignación.

> Finalmente, los algoritmos matemáticos utilizados en la etapa de asignación son diferentes entre la classifica-

ción supervisada (paralelepípedo, mínima distancia y/o máxima probabilidad) y la no supervisada (isodata).

Es muy frecuente que en el proceso de generación de cartografía temática se utiliza en etapas previas clasificación no supervisada y para etapas definitivas clasificación supervisada.

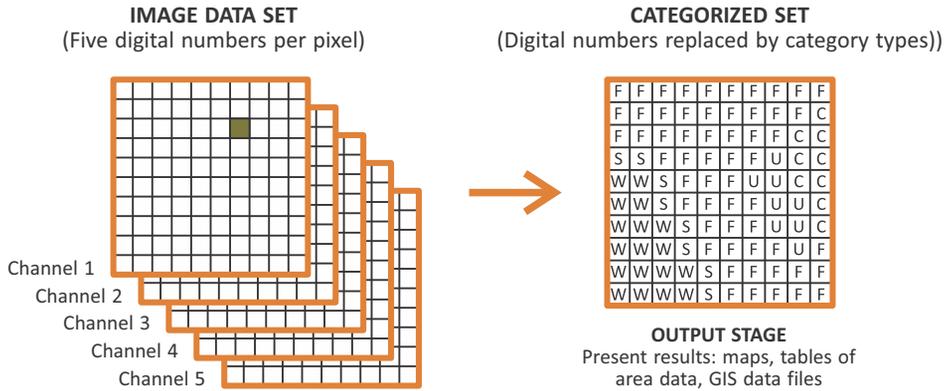


Figura 26. Clasificación de una imagen multispectral. El proceso de clasificación transforma un archivo raster multispectral (5 bandas en el ejemplo de la figura) compuestos por niveles digitales (ND) que varían en un rango de valores acorde a la resolución radiométrica de la imagen (por ejemplo 2⁸ bits = 0 a 255), en otro archivo raster de una sola banda en la que cada pixel toma valores dentro de un rango discreto y acotado (categorías).



Figura 27. Descripción del proceso de clasificación de imágenes satelitales. Las etapas (parte superior de la figura) se concatenan de manera dependiente. La detección de situaciones anómalas a lo largo del proceso, deben ser revisadas y corregidas regresando a la etapa de entrenamiento (flechas negras con líneas cortadas). Las diferentes etapas presentan diferencias conceptuales y metodológicas si la clasificación es supervisada o no supervisada.

En la etapa de entrenamiento, la primer tarea es definir las clases informacionales (por ejemplo tipos de vegetación en un potrero de un campo ganadero), y ubicarlas espacialmente con la ayuda de un receptor GPS. Luego, deben digitalizarse en pantalla sobre la imagen satelital, para generar una tabla de las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento de las clases informacionales (Figura 28).

Luego de completar la etapa de entrenamiento comienza la etapa de análisis espectral de las áreas de entrenamiento.

En esta etapa se analiza la separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento, la homogeneidad o heterogeneidad espectral de las mismas mediante las estadísticas de las mismas (Figura 29). Las tablas con las estadísticas (media, desviación estándar, mínimo y máximo) de cada banda para cada clase pueden ser copiadas y llevadas a una planilla de cálculos como por ejemplo Excell, lo cual facilitaría la realización de diferentes análisis estadísticos.

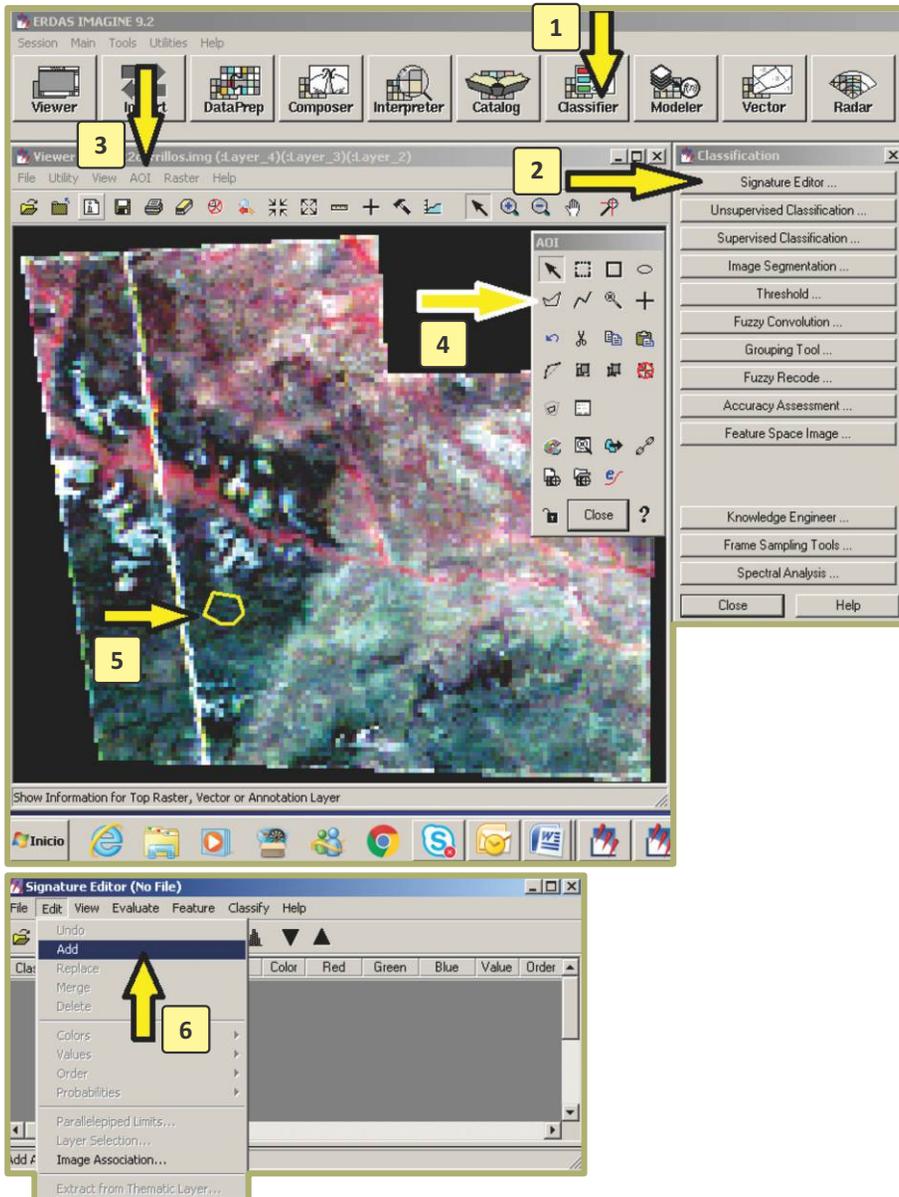


Figura 28. Descripción de la etapa de entrenamiento del proceso de clasificación supervisada en el software Erdas Imagine. En el ícono "Classifier" (1) se selecciona la opción "Signature editor" (2) que despliega la tabla de firmas espectrales (debajo de la figura). Luego, dentro del "viewer" donde se encuentra desplegada la imagen, se selecciona abrir el menú "AOI" (3), para elegir el ícono "polígono" (4), que permite digitalizar el área de entrenamiento correspondiente en la imagen (5) y agregar sus propiedades espectrales en la tabla de firmas espectrales, "Signature editor" (6).

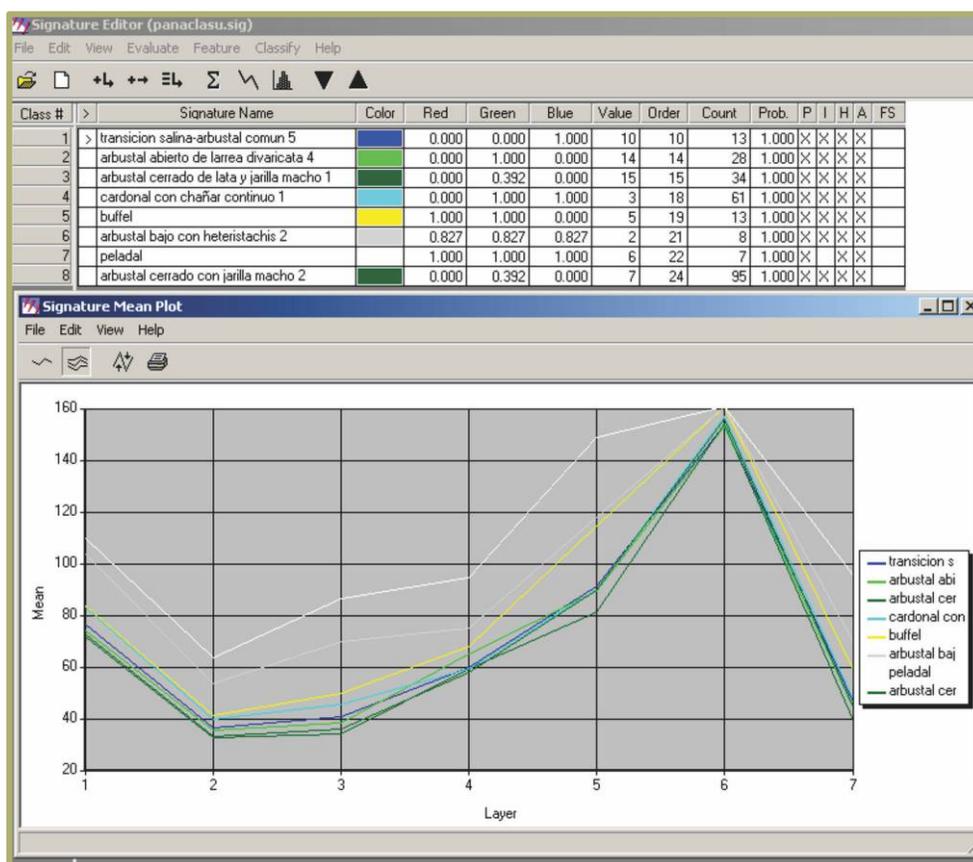


Figura 29. Tabla completa ("Signature editor") de las firmas espectrales de áreas de entrenamiento (8 áreas) delimitadas sobre una imagen Landsat TM5 de 7 bandas (panel superior). Es posible dentro de la tabla darle el nombre apropiado al área de entrenamiento (clases informacionales) y seleccionar el color con el cual se la identificará en las estadísticas. Nivel digital (ND) promedio (firma espectral) de cada una de las áreas de entrenamiento en cada una de las 7 bandas de Landsat TM5 (panel inferior).

Para analizar las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento, no solo es importante analizar sus estadísticas sino también su comportamiento espacial, lo que sería un indicador del futuro resultado de la clasificación supervisada (Figura 30). Este análisis puede hacerse para cada área de entrenamiento individualmente o todas al mismo tiempo, utilizando algún software especializado.

La etapa de asignación de cada píxel, en función de sus niveles digitales (ND) a alguna de las clases predeterminadas, puede ser a partir de diferentes algoritmos de acuerdo a si la clasificación es supervisada o no supervisada (Figura 31). Si la clasificación es supervisada puede seleccionarse entre 3 algoritmos de asignación, paralelepípedo, mínima distancia o máxima probabilidad. Si la clasificación fuera no supervisada el algoritmo a utilizar es isodata.

> **Algoritmo del paralelepípedo:** En este método, el usuario fija un área de dominio para cada categoría, teniendo en cuenta sus valores de centralidad y disper-

sión. Posteriormente, un píxel es asignado a dicha clase si sus ND están dentro de esa área de dominio, en todas las bandas consideradas. Así, el píxel asignado a la clase A si sus ND se encuentran a menos de una determinada distancia del centro de clase A. Esa distancia se fija por el intérprete, aunque suele identificarse con la desviación típica, o con un múltiplo suyo. Este criterio de asignación tiende a delinear unos polígonos multidimensionales de lados paralelos, de ahí su nombre. Los principales problemas de este método parten de su misma concepción. El diseño de áreas de dominio implica, por un lado, que haya píxeles en zonas comunes a dos o más categorías, y por otro, que algunos píxeles queden sin clasificar.

> **Algoritmo de la mínima distancia:** El criterio más sencillo para asignar un píxel a una de las categorías consiste en incluirlo en la más cercana. Esto es, en aquella que minimice la distancia entre ese píxel y el de los valores correspondientes al centro de clase. No se trata de una distancia geográfica, sino espectral, consecuencia de comparar los ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las

bandas que intervienen en el análisis. Este algoritmo es bastante sencillo y rápido de ejecutar, y puede ofrecer buenos resultados cuando no se observe un gran solape

entre categorías. Puesto que siempre existe una clase más cercana, no deja lugar a píxeles sin clasificar, incluso aunque éstos se alejen notablemente del centro de clase.

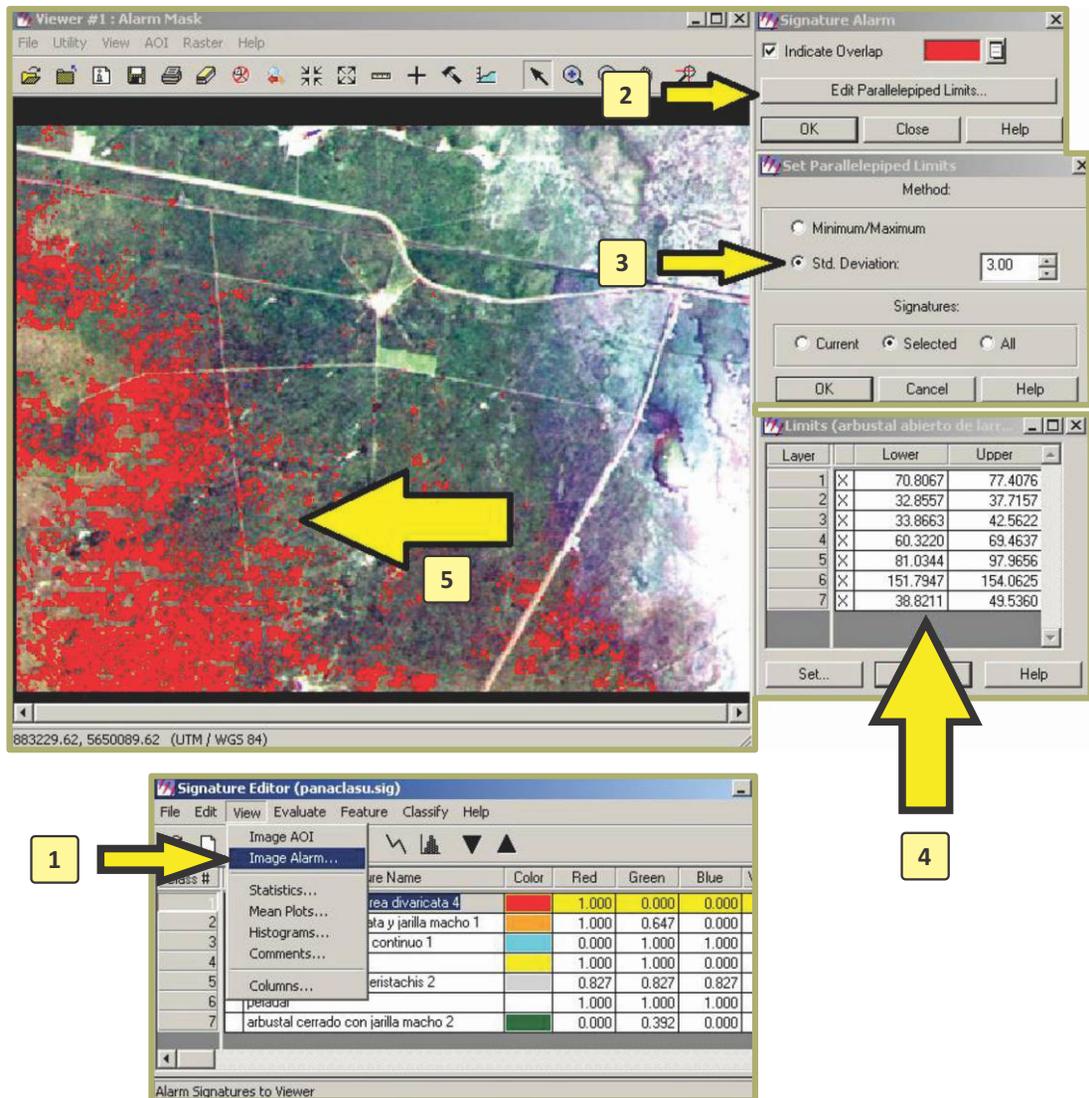


Figura 30. Análisis espectral de las áreas de entrenamiento. Visualización de la posible distribución espacial de un área de entrenamiento sobre una imagen original a partir de sus datos espectrales, proceso denominado "Image alarm". El proceso "image alarm" se selecciona desde el menú de la tabla de firmas espectrales de las áreas de entrenamiento, "signature editor" (1, panel inferior izquierdo). Así, se despliega una pequeña ventana (Panel superior derecho) en el cual se selecciona el color con que se desea observar la distribución espacial del área de entrenamiento (rojo en el caso del ejemplo), y además se puede editar los límites estadísticos ("edit parallelepiped limits") con los que se desea hacer la superposición espacial (2). Luego, se abre la ventana "Set parallelepiped limits" en la cual se define el método estadístico con el cual se editará la o las áreas de entrenamiento a superponer (3). En el caso del ejemplo se seleccionó superponer la clase "arbustal abierto de Larrea divaricata" (fila 1 seleccionada en la tabla de firmas espectrales) mediante el método "Std. Desviation", con 3 valores inferiores y superiores respecto a la media. Estos valores límites inferiores ("Lower") y superiores ("Upper") para cada una de las 7 bandas se observan en la tabla desplegada en el panel inferior derecho (4). Así, es posible observar en rojo sobre la imagen la distribución espacial de una determinada área de entrenamiento (5).

> **Algoritmo de la máxima probabilidad:** este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Esa función, asemeja la distribución real de los ND en esa categoría., por lo que nos sirve para calcular la probabilidad de que un píxel (con determinados ND) sea incluido en ella. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo. Sin embargo, es el más empleado, por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

> **Algoritmo isodata:** este algoritmo procede a partir de determinadas fases. Primero se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario, y se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase mas próximo. Luego, se calculan nuevos centros de clase, teniendo en cuenta los valores

de todos los píxeles que se le hayan incorporado en la fase anterior. Posteriormente, se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro mas cercano (el cual debido al desplazamiento registrado en el primer paso podría no coincidir con la anterior asignación) y vuelven a calcularse los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones. Finalmente, el proceso se repite iterativamente hasta que el centro de clase no se desplace significativamente, lo que indica un buen ajuste a los grupos presentes en la imagen. Desde el punto de vista estadístico, este algoritmo parece bastante adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. Sin embargo, en ocasiones resulta artificioso señalar unos parámetros de control significativos, puesto que el usuario no conoce, de partida, el número de grupos espectrales presentes en la imagen, ni el valor idóneo de dispersión interna o de distancia entre grupos. De esta forma, el método no supervisado se convierte en un proceso interactivo, en donde el usuario establece unos valores arbitrarios que se van modificando a la vista de los resultados.

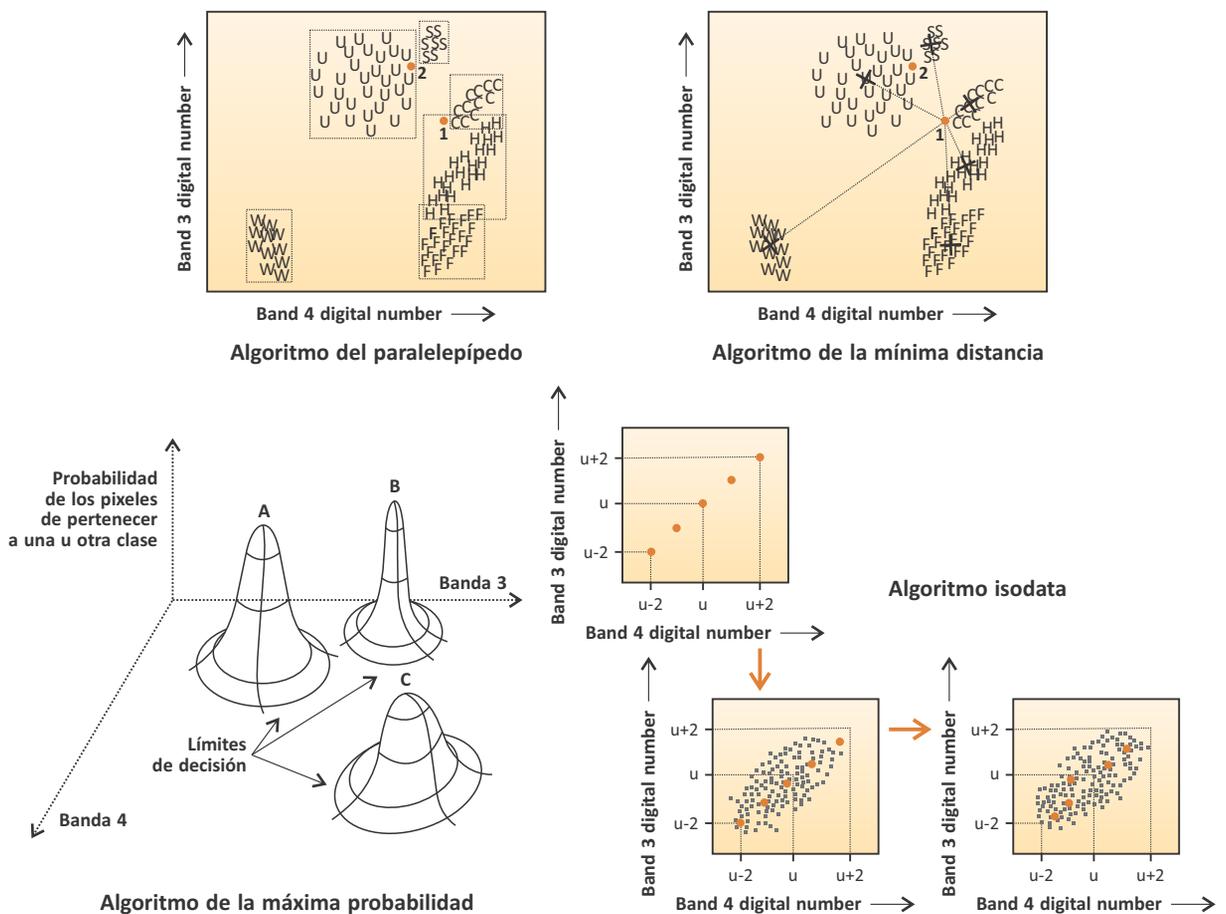


Figura 31. Diagrama simplificado (solo para dos bandas espectrales) de los algoritmos utilizados para la etapa de asignación de píxeles a cada clase predeterminada de acuerdo a sus niveles digitales (ND). Los algoritmos paralelepípedo, mínima distancia y máxima probabilidad se utilizan en la clasificación supervisada, y el algoritmo isodata (proceso iterativo automático de al menos 3 etapas) en la clasificación no supervisada.

La etapa de asignación o clasificación propiamente dicha es fácilmente realizable en los software tradicionalmente utilizados en el procesamiento digital de imágenes satelitales (Figura 32).

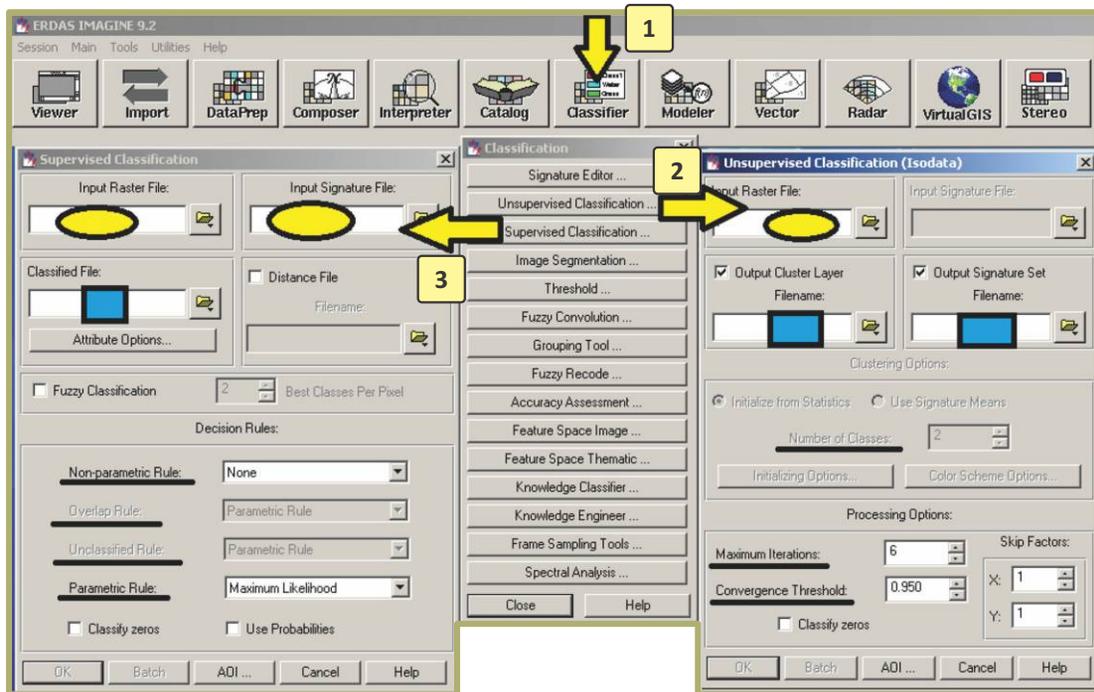


Figura 32. Etapa de asignación o clasificación propiamente dicha en Erdas Imagine. Se selecciona "Classifier" (1) desde el menú principal, y desde el menú desplegable se selecciona clasificación no supervisada (2) o clasificación supervisada (3). En las ventanas de ambas clasificaciones se solicitan los nombres de archivos de entrada (simbolizados con elipses en la figura) y de archivos de salida (simbolizados con rectángulos en la figura). En la clasificación supervisada hay dos archivos de entrada, la imagen original que se desea clasificar ("Input raster file") y el archivo de firmas espectrales de las áreas de entrenamiento ("Input signature file"), y un solo archivo de salida que es la imagen clasificada ("classified file"). Contrariamente, en la clasificación no supervisada hay un solo archivo de entrada ("Input raster file") y dos archivos de salida, el archivo de firmas espectrales de las clases resultantes ("Output signature set") y la imagen clasificada ("output cluster layer"). Para la clasificación supervisada se deben definir el tipo de algoritmo ("Non parametric rule" o "Parametric rule"), si se elige "Non parametric rule" hay que seleccionar que decisión tomar en caso de superposición en la asignación ("overlap rule") o de indefinición en la asignación ("Unclassified rule"). Para la clasificación no supervisada se define el número de clases ("Number of classes"), el número máximo de iteraciones al que se desea que se detenga el proceso ("Maximum iterations") y con qué umbral de convergencia debe ocurrir el final del proceso ("Convergence threshold").

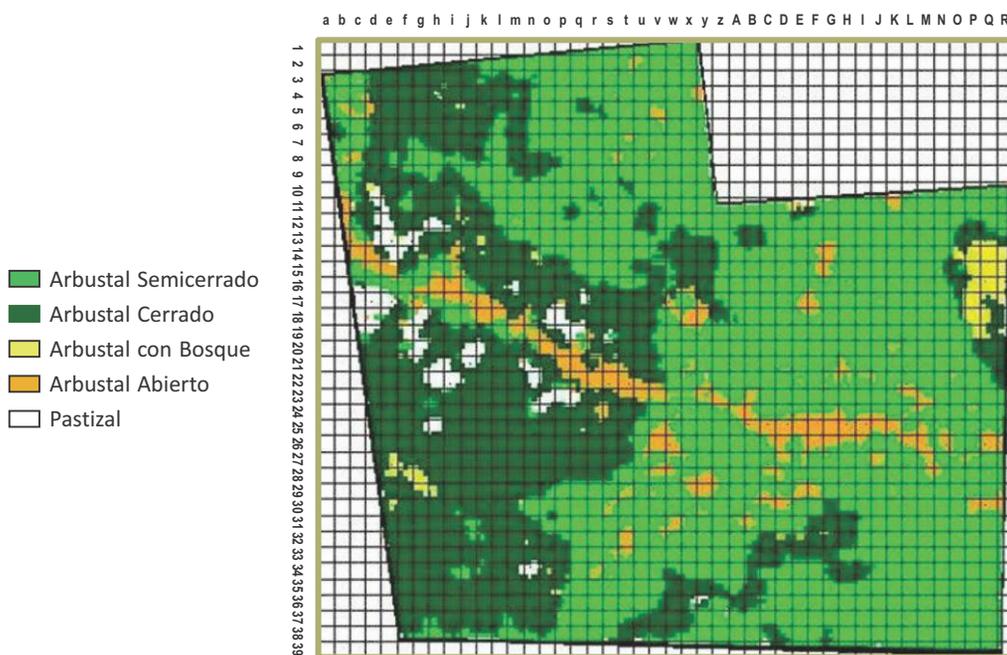
Luego de finalizada la etapa de asignación se inicia la etapa de evaluación de la precisión de la clasificación (Figura 33). Esta etapa se lleva a cabo en el terreno. Básicamente consta de seleccionar una determinada cantidad de sitios al azar, y comprobar el grado de coincidencia entre la clase observacional detectada a campo y la clase espectral resultante de la clasificación de la imagen. El número de sitios seleccionados al azar debe ser suficiente como para representar la heterogeneidad espacial del sitio clasificado. La metodología estadística para estimar el grado de precisión de la clasificación (coincidencia entre clases observacionales y clases espectrales) se denomina matriz de

confusión. La matriz de confusión no solo nos brinda la posibilidad de determinar la precisión global del proceso sino también detectar las clases donde ocurrieron las principales "confusiones". La precisión global de la clasificación se estima como el porcentaje de aciertos (diagonal principal de la matriz de confusión) en relación al número total de sitios muestreados al azar.

En el ejemplo de la Figura 33. Se superpone una matriz alfa numérica sobre la imagen clasificada, de la cual se seleccionaron 55 sitios al azar. El azar es restringido a aquellas celdas que son accesibles (cercas a huellas). Luego, con la ayuda de un receptor GPS se visita esas

celdas en el terreno y se registra a que clases informacionales pertenecen. Posteriormente se ingresa en esas mismas celdas en la imagen clasificada y se registra a que clases espectrales corresponden. Finalmente, mediante la matriz de confusión se comprueba que 46

sitios (sumatoria de la diagonal principal) de los 54 relevados (sumatoria de las filas y/o columnas) son aciertos (85,2%). También se detecta que la confusión más relevante ocurre entre las clases arbustal cerrado y arbustal semi-cerrado.



Clases Informacionales (Unidades de Vegetación)						
Clases Espectrales	Arbustal Abierto	Arbustal Semicerrado	Arbustal Cerrado	Pastizal	Arbustal con Bosque	Σ
Arbustal Abierto	10					10
Arbustal Semicerrado	2	18	2			22
Arbustal Cerrado		4	10			14
Arbustal con Bosque				4		4
Pastizal					4	4
Σ	12	22	12	4	4	46 54 85,2 %

Figura 33. Etapa de evaluación de la precisión de la clasificación. Estrategia para seleccionar sitios al azar en la etapa de evaluación, superponiendo una matriz alfa numérica sobre la imagen clasificada (figura superior). Matriz de confusión con 46 aciertos de 54 sitios relevados al azar.

Resulta bastante frecuente que los resultados de una clasificación digital adolezcan de una excesiva fragmentación. Así, las diversas categorías se imbrican entre sí, en una compleja sucesión espacial. Manchas de color, más o menos homogéneas se encuentran “salpicadas” por píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultándose la interpretación de los resultados. Este suceso se denomina coloquialmente, en la bibliografía anglosajona, “efecto de sal y

pimienta” (salt and pepper), y se debe a una doble causa: por un lado, a que la mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta la pertenencia de píxeles vecinos, y por otro, a la propia complejidad del paisaje, directamente relacionada con la aparición de píxeles de borde-fronterizos a dos o mas categorías, que son los principales responsables de la discontinuidad visible en el mapa.

Para salvar este problema, suele aplicarse una técnica de suavización de resultados (filtros espaciales). Sobre la imagen clasificada no puede aplicarse un filtro convencional, puesto que cualquier promedio de píxeles vecinos introduciría cambios imprevisibles en la clasificación. El objetivo último es reasignar píxeles aislados o pocos significativos, facilitando una distribución espacial más nítida de las distintas categorías (Figura 34). Para ello, se procede a comparar la clase asignada a cada píxel con la que ofrecen los píxeles vecinos. Si esa clase es similar a los píxeles del entorno,

se mantiene la asignación original. Caso contrario, se modifica. Normalmente esta comparación se realiza a partir de una ventana móvil de 3 x 3 píxeles, si bien la técnica es independiente de su tamaño. En la terminología habitual se distinguen, a este respecto, dos tipos de filtro:

- > **Filtro modal:** El píxel situado en el centro de la matriz se asigna a la categoría mas frecuente entre los píxeles vecinos, siempre que, lógicamente, no pertenezca ya a ella.
- > **Filtro de mayoría:** El píxel central se asigna a la categoría que cuenta con la mitad mas uno de los píxeles vecinos. ☑

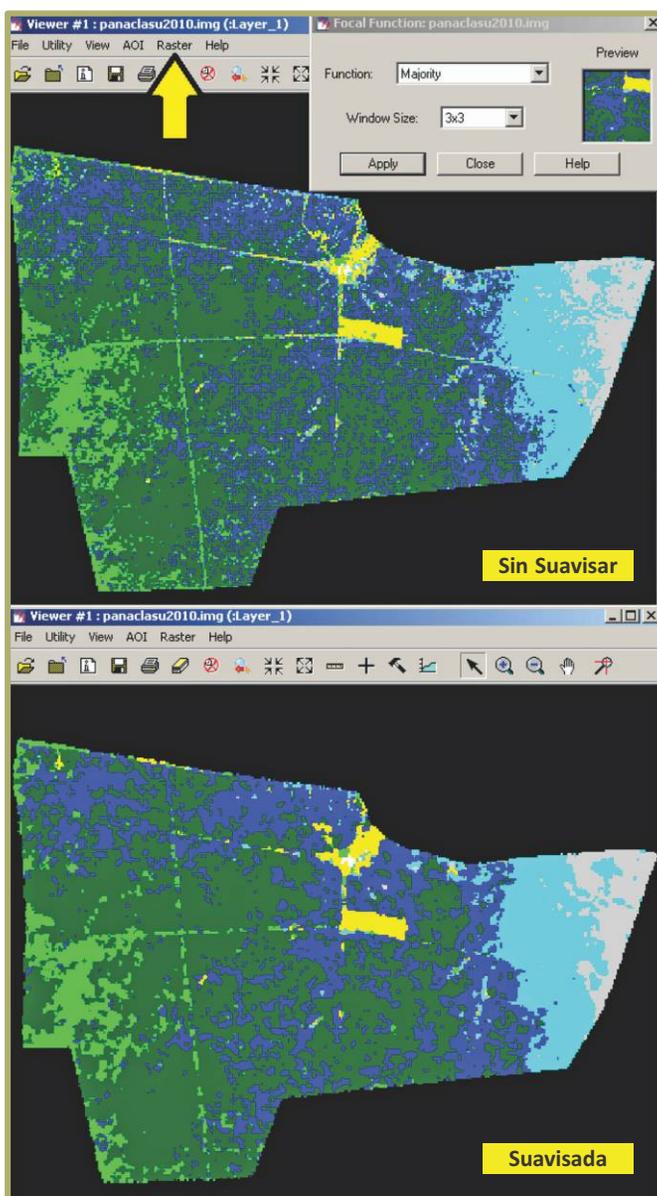


Figura 34. Etapa de suavización de resultados. Sobre una imagen clasificada, abierta en un viewer de Erdas Imagine, se selecciona la opción "raster" y dentro de la misma la opción "filtering" - "statistical filtering". En el ejemplo de la figura se aplicó un filtro de mayoría ("majority") para una ventana móvil ("window size") de 3 x 3 píxeles. El efecto de la suavización puede realizarse comparando la imagen superior con la inferior.

6. BIBLIOGRAFÍA

□ **Arozarena Villar, A.** “Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes”.

(<http://ocw.upm.es/ingenieriacartografica-geodesica-y-fotogrametria>).

□ **Chuvieco, E. 1996.** Fundamentos de Teledetección 1° Edición, Madrid, RIALP.

□ **Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. 1994.** Remote Sensing and Image Interpretation. Third edition pp.750.

□ **Mehl, H.; Peinado, O. 1997.** Fundamentos del Procesamiento Digital de Imágenes. En: Aplicación de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la gestión de recursos naturales. Parte I: Fundamentos teóricos y prácticos. Harald Mehel y Erich Mies Editores.

□ **Paruelo, J., Di Bella, C. y Milkovic, M. (editores). 2014.** Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.

□ **Reuter, F.** Práctico 9: “Procesamiento digital de imágenes”. Carpeta de trabajos prácticos de la Cátedra “Teledetección Forestal”. Carrera: “Ingeniería Forestal”. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero (Argentina).

(<http://fcf.unse.edu.ar/archivos/lpr/pdf/p9.PDF>).

□ **NOTA:** *Algunas de las figuras que forman parte de este texto fueron obtenidas desde la web con el buscador “Google” y luego editadas y modificadas para adaptarlas a los objetivos de esta guía.* ☑



CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN FISONÓMICA-FLORÍSTICA DE LA VEGETACIÓN

Walter Agüero, José Molina y Fernando Biurrun (INTA EEA La Rioja)

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las comunidades vegetales desde el punto de vista ecológico como la conocemos actualmente (ecología vegetal) es una ciencia relativamente nueva. No obstante, es evidente que es una temática que ha ido evolucionando hacia nuestros tiempos; desde las observaciones de Aristóteles (384-322 a. C.) dividiendo al reino vegetal en plantas con flores y plantas sin flores, hasta los cientos/miles de autores actuales. Sin embargo, no es hasta principios-mediados del siglo XX donde esta disciplina comienza a desarrollarse y donde se ponen en juego ideas o interpretaciones sobre aspectos de la “ecología moderna” de las comunidades vegetales que incluso actualmente se siguen discutiendo. Entre esas “ideas o postulados”, las que con más fuerza y discusión se plantearon fueron las “organísmicas” (Clements) versus las “individualistas” (Gleason) o “continuum” (MacIntosh). Sus diversos puntos de vista y metodologías utilizadas, son considerados como el punto de partida en el estudio de evaluación de las comunidades vegetales. Sin embargo, algunos autores afirman que ambas ideas antagónicas pueden ser parcialmente validas dependiendo del lugar y momento determinado.

El “quid de la cuestión” no es si hay o no comunidades identificables (con mayor o menor facilidad) sino hasta qué punto las relaciones/interacciones entre todos los

organismos (biológicos) influyen en la estructura de una determinada comunidad vegetal, comparándolas a éstas relaciones/interacciones con las condiciones/restricciones de los factores del ambiente físico. Las formaciones vegetales son las resultantes de las múltiples combinaciones posibles de factores ambientales (luz, suelo, agua, nutrientes, etc.), factores antrópicos y bióticos. Así, existen numerosas combinaciones posibles entre estos factores, y por lo tanto las formaciones vegetales tienen muchísimas “*formas de expresarse*”. Si bien es cierto que en distintas áreas/zonas se repiten situaciones, que de cierta manera son similares en cuanto a los “tipos de vegetación”, es importante tener en cuenta que no existen dos espacios ocupados por comunidades vegetales exactamente iguales. Es por ello que, para el estudio de las diversas formas de expresión de la vegetación (comunidades vegetales), deberíamos entender y/o conocer mínimamente los factores y procesos (fuerzas) que actúan e interactúan en ellas. Luego, la conjunción de esos factores y procesos de alguna manera se ve expresada en la comunidad vegetal, es decir, “*la cara visible*” para nuestro análisis en un lugar y momento determinado (contexto particular). Es válido entonces realizarnos preguntas, como por ejemplo: ¿porqué ciertas especies crecen/están en un determinado lugar?, ¿qué factores determinan su presencia allí?, ¿tendrán requerimientos similares/iguales?,

¿su presencia se debe a factores ambientales/bióticos/antrópicos?, etc. Si bien existen muchísimos estudios que abordan a las comunidades vegetales para responder a estas y otras incógnitas, también es cierto que muchos de ellos abordan a las mismas, estrictamente desde la descripción fisonómica y florística. ☑

2. ¿QUÉ ES UNA COMUNIDAD VEGETAL?

De acuerdo a un posible orden para su estudio, los niveles de organización en forma jerárquica tradicional para muchos son individuo, población, comunidad y ecosistema, aunque existen otras posibilidades. Seguramente en nuestra cotidianidad nos hemos podido dar cuenta o hicimos el ejercicio de diferenciar una comunidad vegetal o formación vegetal de otra, basando esa diferenciación posiblemente sobre su fisonomía (aspecto particular de una determinada formación vegetal). Así por ejemplo, pudimos diferenciar un bosque respecto de una pradera o de una estepa o cualquier otra formación. Sin embargo, es cierto también que existen diferencias (aunque a veces sutiles) dentro de una misma formación vegetal con la misma fisonomía. Es por ello que, estas formaciones de aspecto particular o característico representan muchas veces para nosotros la comunidad vegetal. Al ser “comunidad vegetal” un término muy utilizado, y como sucede con muchos otros de igual importancia, diferentes definiciones o conceptos se han dado por diversos autores sobre lo que es en realidad una comunidad vegetal. Es difícil entonces, encontramos con una definición precisa que sea “común a todos” (generalmente aceptada) debido a que actualmente sigue en discusión dentro de la ecología vegetal.

Encontramos, entre muchas otras, definiciones como:

... “la comunidad vegetal puede ser definida como el conjunto de especies que crecen juntas en una localidad particular, la cuales presentan una asociación o afinidad entre ellas”.

... “una comunidad vegetal es el conjunto de plantas que prospera en un determinado hábitat y que, a su vez, puede ser caracterizado por una serie de factores ecológicos”.

... “una comunidad consta simplemente de todas las plantas que ocupan un área definida por el ecólogo con el objetivo de su estudio”.

... “una comunidad es una combinación de plantas que son dependientes de su ambiente, que ejercen una mutua influencia y que modifican su propio ambiente”.

Si por un momento nos ponemos en el papel del “ecologista vegetal” y revisamos rápidamente estas definiciones podemos observar que uno de estos cuatro conceptos es diferente al resto, donde al parecer, entre éstos, parecen haber sido concebidos bajo visiones diferenciadas (¿Clementsianas vs Gleasonianas? u otras?). Sin embargo, actualmente muchos (por no decir la mayoría) investigadores están de acuerdo que ciertas comunidades vegetales se repiten en el espacio, (punto de vista intermedio entre las posturas de Gleason y Clements). Si aún, somos más “realistas”, las visiones actuales abordan la teoría de unidad de comunidades la cual expone que, en un lugar, área o región, la vegetación se distribuye como un mosaico.

Todo lo expresado anteriormente no es para posicionarnos en una u otra visión de cómo deberíamos considerar a las comunidades, ni mucho menos para ponernos en el papel de juez, si tal o cual podría ser la definición correcta de comunidad vegetal. Si no, independientemente de todo esto, entender que muchos argumentos, puntos de vista, formas, etc. se discuten desde diversos aspectos del estudio de la vegetación. Por ello es importante darnos el tiempo y la posibilidad de discusión, y preguntarnos sobre cuestiones a resolver en nuestras situaciones reales, con nuestros conocimientos, interpretaciones o visiones de la vegetación, y esto lo debemos entender desde dos puntos importantes que son: cada situación se encuentra dentro de un contexto particular y que en el estudio de las comunidades (en esos contextos) nada está estandarizado o no hay “recetas” puntuales para cada caso. ☑

3. ¿PORQUÉ Y PARA QUÉ ESTUDIAR LAS COMUNIDADES VEGETALES?

Al igual que en otras áreas temáticas, los estudios de las comunidades se pueden realizar desde diferentes puntos de vista de acuerdo a nuestras necesidades. Así por ejemplo, los más característicos que se realizan sobre la vegetación son los descriptivos (exploratorios, sin hipótesis, información de base), los comparativos (con información previa, con hipótesis), los observacionales (se basan en información del sistema en su estado original, no hay manipulación del sistema) y los experimentales (manipular, modificar los sistemas - tratamiento experimental). Además está decir que, para responder esta pregunta sobre el porqué o para qué, debe estar preestablecido básicamente por los objetivos de estudio que nos proponemos. Como en cualquier estudio, el éxito de éste dependerá de cuan claros estén, a priori, establecidos dichos objetivos/metás sobre lo que se

pretende “*buscar*”, “*observar*”, etc. en una determinada comunidad vegetal. Si en ese “*a priori*” se establece que se pretende “*caracterizar*” o “*describir*” la vegetación debemos complementar una serie de pasos para esto. ☑

4. SOBRE LAS MEDICIONES EN LAS COMUNIDADES VEGETALES

4.a. ¿Qué medimos de las comunidades vegetales?

Es sabido que, para el estudio de la vegetación, a nivel de comunidades, es imposible operativamente medir a todos los individuos, por lo que dicha medición la realizamos a través de *muestreos* y mediante ellos poder obtener *estimaciones* de ciertos parámetros (de nuestro interés) de las comunidades vegetales.

Las formaciones vegetales o comunidades vegetales constituyen componentes muy importantes, desde diversos puntos de vista (ecologista, paisajístico, productivista, etc.), para la caracterización de una determinada zona, área o región, por lo que su descripción resulta de mucho interés. En su descripción debemos considerar dos aspectos centrales que son el florístico y el fisonómico. La descripción florística hace referencia a las especies presentes en determinado lugar y a partir de éstas caracterizar la vegetación desde el arreglo particular de dichas especies (lista de especies del lugar). Por otro lado, la fisonómica está determinada por la proporción en que cada forma de vida (ej.: árboles, arbustos, hierbas, musgos, etc.) contribuye a la comunidad (ej.: cobertura continua o dispersa), es decir, es una descripción desde el punto de vista estructural a través del ordenamiento espacial de los estratos. Para caracterizar florísticamente y fisonómicamente necesitamos estimar ciertos *atributos* de la vegetación los cuales pueden ser *cualitativos* o *cuantitativos*.

La decisión de utilización de atributos *cualitativos* o *cuantitativos* para la evaluación de las comunidades vegetales esta dado sin dudas por el objetivo del mismo (descriptivo, comparativo, observacional, experimental). Es importante tener en cuenta que el uso de unos u otros presenta a su vez, entre ellos, ventajas y desventajas. Así por ejemplo los *cualitativos* son muy eficientes en términos de tiempo de muestreo y costos, y son generalmente muy descriptivos y sin inferencia estadística. Por otro lado, para obtener atributos *cuantitativos* implica mayor tiempo de muestreo y sus costos tienden a aumentar.

Otro aspecto importante que debemos tener en cuenta también al momento de evaluar la vegetación, tiene que ver con la *objetividad* y *subjetividad* en nuestras observaciones sobre los parámetros, que está dado simplemente por la “*percepción personal*” de lo que vemos (no todos vemos/estimamos los parámetros de igual forma). Por lo general, muchos tienen propensión a subestimar los parámetros menos notables y a sobrestimar los que son muy visibles. A su vez, este aspecto tiene mucha relación con el muestreo (método) que se elige para la evaluación. Así por ejemplo, en un *muestreo subjetivo*, el lugar donde se realizan las evaluaciones es elegido “*conscientemente*” como un “*lugar representativo*” de la comunidad vegetal, mientras que en un *muestreo objetivo* el/los lugar/es es seleccionado bajo criterios metodológicos preestablecidos (ej.: muestreo aleatorio, sistemático, etc.).

4.b. ¿Cómo medimos las comunidades vegetales?

> Escala de trabajo

Cuando consideramos a la comunidad vegetal como unidad observacional, la elección de la escala de trabajo, tanto la espacial como la temporal (lugar y momento), deben estar preestablecidas básicamente por los objetivos del estudio, así mismo también por el tiempo y recursos disponibles. Es evidente, que para estudios que implican mayor nivel de detalle o precisión en cualquier escala (predial, de comunidad, regional, etc.) se debe invertir más tiempo y recursos que un estudio planteado en forma inversa. Independientemente de la escala elegida debemos tener muy en cuenta que ésta va a condicionar los aspectos que vamos a considerar, la percepción y su medición. Si en el mismo estudio vamos considerar la escala temporal sobre las comunidades vegetales, debemos considerar que esto tiene por lo menos dos interpretaciones válidas de ella:

- a) en momento puntual en el tiempo, ej.: dd/mm/aa
- b) varios momentos en el tiempo (frecuencia), ej.: evaluaciones diarias, mensuales, anuales, etc.

> Delimitación de áreas homogéneas (véase también capítulo imágenes satelitales)

La delimitación de áreas homogéneas con la ayuda de herramientas como las imágenes satelitales, para muchas áreas, es una de las formas que nos facilita el estudio de las comunidades vegetales. Sin embargo, para determinadas regiones (montañosas) no es posible su aplicación y debemos valernos de otras formas o métodos (fotografías aéreas). Una vez que las áreas homogéneas (más de una) están establecidas, uno de los pasos fundamentales

es su corroboración a campo (incluso con muestreos) y allí establecer, por ejemplo, si dichas áreas se corresponden diferentes comunidades o se trata de una misma comunidad con variaciones que pueden atribuidas a otros factores. ☑

5. METODOLOGÍAS

Diversas metodologías se han desarrollado alrededor del mundo para realizar evaluaciones sobre la vegetación. La elección del método a utilizar esta dado por todas las consideraciones descritas anteriormente. Una de las características principales de los métodos son “las formas” sobre las cuales se realizaran las estimaciones (método de muestreo), dentro de las formas más comunes están las transectas en faja, transectas lineales, cuadrantes, entre otros.

... “las variables pueden estimarse por medición, conteo o mediante evaluación subjetiva. Los datos de vegetación por lo general tienen una varianza poblacional muy alta, sin embargo la varianza de la variable estimada puede reducirse de dos maneras: a) mejorando la precisión en la medición o b) incrementando el tamaño de la muestra. En muchos casos la primera alternativa resulta ineficiente para los datos vegetacionales, es por ello que a menudo se emplean evaluaciones subjetivas a pesar de las desventajas de que adolecen, ya que por ser más rápidas permiten tomar muchas muestras en un tiempo relativamente corto y con poco esfuerzo”... (Mateucci y Colma, 1982).

A fines de aplicación práctica de este curso utilizaremos 2 métodos para evaluación de la vegetación:

> Método de “Punta de pie” (The Step-Point Method - Evans and Love).

> Método Braun-Blanquet (Relevé Method).

5.a. Método de “Punta de pie”

También conocido como “puntos de intercepción”, “puntos con pasos”, “transecta de pasos”, etc.; el muestreo a través del método de punta de pie es un método rápido, preciso y objetivo para determinar parámetros como composición botánica, frecuencia y cobertura de la vegetación (herbácea y leñosa) de una determinada comunidad o formación vegetal. Es decir, atributos que nos permiten describir a la vegetación. Es posible también obtener parámetros adicionales como “suelo desnudo” o “mantillo”, cubierta vegetal muerta sobre el suelo.

El muestreo de la vegetación se realiza sobre una transecta lineal (Figura 35), esta transecta puede ser materializada mediante una cinta métrica por ejemplo o simplemente caminando sobre una línea “imaginaria” mediante un

rumbo fijo obtenido con una brújula (Figura 35). La ubicación de las transectas en el área a estudiar se pueden establecer a priori bajo un diseño determinado (al azar, regular, estratificado, etc.) o seleccionando en dicha área, los lugares que nosotros consideramos más homogéneos (“representativos”). La metodología consiste en anotar todas las especies o bien agrupadas en “formas de vida” si no se conocen las especies (hierba, gramínea, subarbusto, arbusto, árbol, trepadora, epífita, etc.) que se encuentran a “ciertos puntos” equidistantes de dicha transecta, utilizando una varilla (altura variable) u otro dispositivo que se coloca o se hace bajar sobre la punta del pie (Figura 35) y que sirva de “interceptor” (que toque las especies). El “toque” para una planta de una determinada especie debe ser registrado una sola vez, independientemente si en el punto de observación se observa que para dicha especie hay más de un “toque”. Cuando utilizamos el método para realizar un muestreo estratificado (diferentes estratos), es conveniente realizarlo separadamente para cada uno ellos, comenzando a muestrear y anotar en la planilla por el estrato más bajo (Figura 35). La longitud total de la transecta lineal y la decisión a qué distancia entre puntos se realizaran las observaciones (entre una observación y otra) es muy variable, y dependerá del tipo de vegetación (estructura, fisonomía, homogeneidad, etc.).

Sin embargo, el método establece que entre 300-500 puntos de observación son suficientes para captar la variabilidad de una determinada área homogénea. Esta cantidad de observaciones requeridas (300-500) se pueden cumplimentar en más de una transecta (ej.: 2, 3, 4, etc.) en cada área. Así por ejemplo, si nos encontramos en un área donde la vegetación tiene varios estratos y en la misma deseamos evaluar únicamente estratos menores (no a la comunidad) como hierbas y/o gramíneas, posiblemente la longitud de la transecta (para cumplimentar la regla) será menor que si consideramos a estratos superiores (arbustos o árboles) debido al arreglo espacial y tamaño de los individuos en que éstos se presentan.

5.b. Método Braun-Blanquet

El método Relevé, Braun-Blanquet o también denominado método fitosociológico, es una metodología muy utilizada para estimar la dominancia de especies a través de la cobertura de una determinada área, y poder diferenciar-comparar comunidades vegetales en una determinada área.

Este método se caracteriza principalmente, entre otros aspectos, por tres particularidades que son: a) la rapidez con la cual se realiza el muestreo, b) que la obtención de

información extraída de la vegetación es subjetiva, y c) que la elección del lugar donde se realizará el muestreo en la comunidad vegetal o área homogénea también es subjetivo (¿a= ventaja; b= desventaja; c= ventaja o desventaja?). Sin embargo, si debemos mencionar otra característica importante de esta metodología es la información de la composición florística extraída de la comunidad vegetal (lista de especies), ya que es sobre esta información, mediante la cual se basa o enfatiza su análisis. Este método, al igual que otros similares (Raunkiaer 1934 o Daubenmire 1959, 1968), fue diseñado originalmente para describir comunidades vegetales con la particularidad de no poder realizar comparaciones

estadísticas, debido a que las estimaciones de cobertura son observaciones de tipo cualitativas mediante la utilización de "escalas". Con el tiempo a esas escalas se le asignaron valores numéricos para poder realizar análisis estadísticos, es decir, transformar las escalas en variables analíticas. La escala Braun-Blanquet brinda una estimación combinada de la abundancia y cobertura de las especies en la comunidad. En esta metodología la unidad de muestreo es denominado "relevé" o quizás para nosotros el término más conocido es "censo", en el cual se realiza un "inventario fitosociológico". Es entre ellos (cantidad n de censos) que se realizan comparaciones de la vegetación mediante la elaboración de una "tabla fitosociológica".

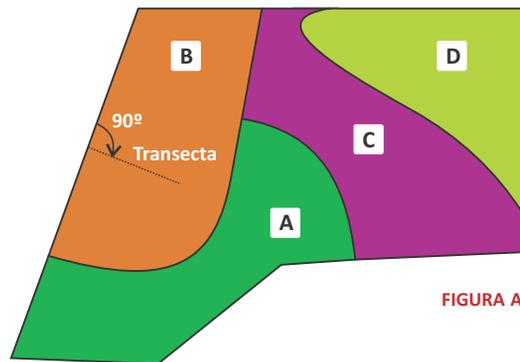


FIGURA A

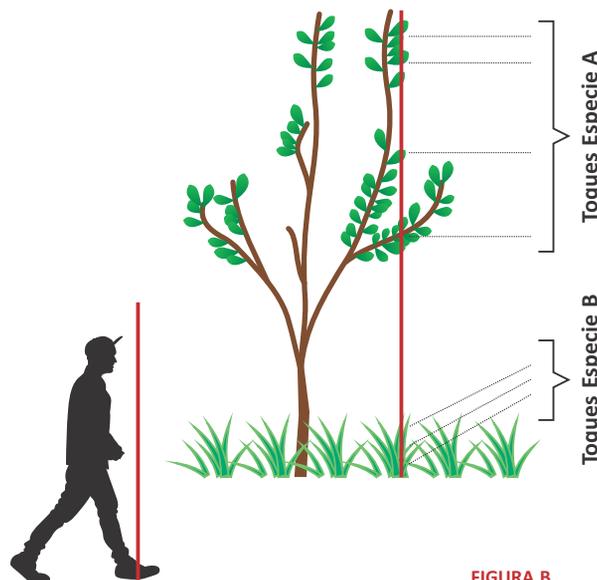


FIGURA B

Figura 35. Esquema del método de punta de pie para relevamiento expeditivo de vegetación. En primer lugar se determina la elección del lugar, la longitud y el rumbo de la transecta lineal para hacer el relevamiento (Figura A). En el relevamiento se utiliza una varilla fina de longitud adecuada a los estratos de vegetación presentes en el sitio, con la cual se verifica las especies "tocadas" en cada estación de muestreo (Figura B). Se puede observar en la figura como en una sola estación la varilla toca 4 veces la especie leñosa "A" y 3 veces la especie graminosa "B", sin embargo en la planilla cada una de las especies debe registrarse como si fuera un único toque. Finalmente, los datos de presencia (1) / ausencia (casillero vacío) son registrados en una planilla especie (fila) x estación (columna) discriminando por forma de vida o estrato (Tabla A). En la parte superior de la planilla se registran otros atributos complementarios (mantillo y/o suelo desnudo).

ESPECIE	ESTACIÓN																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Suelo desnudo	1							1													1									1	
Mantillo		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1
ÁRBOLES																															
<i>Aspidosperma quebracho-blanco</i>														1											1					1	
<i>Prosopis flexuosa</i>														1																	
ARBUSTOS																															
<i>Aloysia gratissima</i>													1																	1	
<i>Baccharis ulicina</i>				1						1															1						
<i>Bougainvillea spinosa</i>								1																					1		
<i>Capparis atamisquea</i>																															
<i>Castela coccinea</i>																															1
<i>Celtis pallida</i>							1	1				1																			
<i>Condalia microphylla</i>																															
<i>Cordobia argentea</i>	1				1	1					1																		1	1	1
<i>Eupatorium patens</i>																															
<i>Justicia squarrosa</i>																															
<i>Lantana xenica</i>																															
<i>Larrea divaricata</i>	1				1						1	1	1		1	1	1											1		1	1
<i>Lycium elongatum</i>																															
HERBÁCEAS - GRAMÍNEAS																															
<i>Digitaria californica</i>				1																											
<i>Digitaria insularis</i>																															1
<i>Eragrostis arthoclada</i>																															
<i>Gouinia paraguayensis</i>																															
<i>Setaria hunzikeri</i>																															
<i>Setaria lachnea</i>																															
<i>Setaria pampeana</i>																															
<i>Trichloris pluriflora</i>																															
<i>Trichloris crinita</i>																															
<i>Tripogon spicatus</i>																															
HERBÁCEAS - LATIFOLIADAS																															
<i>Alliona incarnata</i>																															1
<i>Ayenia lingulata</i>																															
<i>Boerhavia diffusa</i>	1																														
<i>Capsicum chacoense</i>																															

Figura 35 (continuación). Tabla A.

La localización del lugar o sitio dentro de un área homogénea o comunidad para realizar el muestreo (censo o más de uno) con esta metodología, suele ser subjetivo o selectivo (sin diseño). Es decir, que la decisión del lugar o sitio más representativo del área o comunidad es de índole personal. La unidad de muestreo (relevé o censo) es un cuadrante que tiene una superficie conocida, cuya dimensión o tamaño está determinado principalmente por las características de la vegetación a evaluar, es decir, un "área mínima" de muestreo.

Una vez establecida/s el/las área/s a muestrear (áreas homogéneas; formaciones o comunidades vegetales) debemos seleccionar los lugares/sitios donde se realizarán los censos en esas áreas (estructura/fisonomía de la vegetación representativa). Luego, debemos establecer un área mínima de muestreo, la cual debe contener a la mayor cantidad de especies del lugar seleccionado o representativo, es decir que su tamaño depende de la diversidad de especies en el lugar, el tamaño de las plantas y también del espaciamiento (Tabla 1, Figura 36 y Figura 37).

Para establecer o determinar el área mínima se procede de la siguiente forma:

- 1- Partimos estableciendo un área de "x" superficie, por ejemplo un cuadrante de 1m^2 .
- 2- En una planilla se anota la lista de especies incluidas en dicho cuadrante.

3- Se suman las especies (N° de especies) ($\sum N^\circ\text{sp}$ (1m^2) = 7).

4- Luego duplicamos la superficie inicial que consideramos en 1, es decir, 2m^2 .

5- Se registran en la planilla sólo las "nuevas especies" que aparecen, a continuación de la lista anterior.

6- A la sumatoria anterior (punto 3-) se le acumulan las "nuevas especies", por ejemplo si aparecieron 5 "nuevas especies" tendremos $\sum N^\circ\text{sp}$ (1m^2) + $N^\circ\text{sp-nuevas}$ (2m^2) = 12.

7- Los pasos siguientes son el de ir duplicando sucesivamente las superficies anteriores, en nuestro ejemplo: $a=1\text{m}^2$, $b=2\text{m}^2$, $c=4\text{m}^2$, $d=8\text{m}^2$, $e=16\text{m}^2$, etc. (Figura 36) y registrando "nuevas especies" a medida que la superficie va incrementando e ir acumulando las sumatorias de la aparición sólo de nuevas especies, $\sum N^\circ\text{sp}$ (1m^2) + $N^\circ\text{sp-nuevas}$ (2m^2) + + $N^\circ\text{sp-nuevas}(x\text{-m}^2) = n$.

8- El paso 7 se realizará hasta que no exista un incremento importante de "nuevas especies" al ir aumentando la superficie sucesivamente (Tabla 1).

9- El último paso es, en un gráfico (Figura 37), presentando los valores del total acumulado de especies (eje Y: N° de especies) para cada una de las áreas duplicadas (eje X: valores de superficie).

Tabla 1. Modelo de planilla de registro de datos para establecer el área mínima de muestreo de un censo Braun-Blanquet.

ÁREA MUESTREADA (m^2)	NUEVAS ESPECIES	SUMA DE ESPECIES
1	7	7
2	5	12
4	4	16
8	2	18
16	2	20
32	1	21
64	1	22

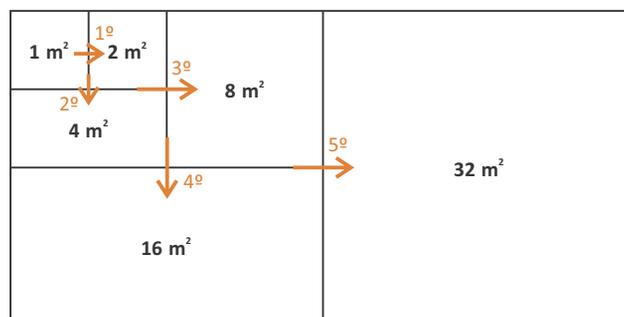


Figura 36. Esquema de determinación del área mínima a campo siguiendo un procedimiento de duplicación progresiva del área relevada.

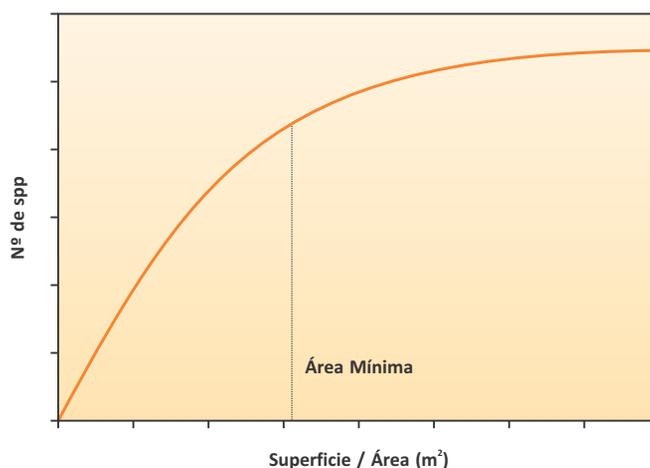


Figura 37. Curva de especie-área para determinar área mínima de un censo Braun-Blanquet (punto de inflexión de la curva de crecimiento del número de especies).

Una vez establecida el área mínima de muestreo se procede a realizar el inventario fitosociológico, que consiste en 2 pasos:

- a) Elaborar un inventario de todas las especies presentes en el área de muestreo, y
- b) Asignarles categorías (escalas) a cada una de las especies de la lista o inventario.

La escala Braun-Blanquet brinda una estimación combinada de la abundancia y cobertura de las especies o también denominado índice de abundancia-

dominancia (Tabla 2), aunque también es posible establecer otros índices a través de este método como el índice de sociabilidad e índice de presencia. Para este caso utilizaremos el índice de abundancia-dominancia que es el más utilizado.

Una vez realizado los censos en las áreas homogéneas (1 o más por área homogénea) el paso siguiente en gabinete es reemplazar los índices por valores numéricos, es decir, a esas escalas transformarlas en “variables analíticas” para poder realizar algún análisis si se desea (Tabla 3).

Tabla 2. Escala de abundancia-dominancia de Braun-Blanquet.

ÍNDICE	SIGNIFICADO
r	Individuos muy raros o solitarios con cobertura despreciable.
+	Individuos con cobertura muy baja (< 1 %).
1	Individuos numerosos o dispersos con cobertura menor del 5 %.
2	Individuos en cualquier número que cubren entre un 5-25 %.
3	Individuos en cualquier número que cubren entre un 25-50 %.
4	Individuos en cualquier número que cubren entre un 50-75 %.
5	Individuos en cualquier número que cubren entre un 75-100 %.

Tabla 3. Transformación de los índices de la escala Braun-Blanquet a valores de cobertura aérea (%).

ÍNDICE	RANGO DE COBERTURA (%)	VALOR ASIGNADO (VALOR MEDIO DEL RANGO %)
5	75-100	87.5
4	50-75	62.5
3	25-50	37.5
2	5-25	15
1	0-5	2.5
+	0.1	0.1

Así por ejemplo, si en un área homogénea determinada realizáramos 4 censos y tendríamos los siguientes resultados para una determinada especie:

ESPECIE	CENSOS			
	1	2	3	4
<i>Larrea divaricata</i>	3	4	3	5

La cobertura para esta especie es igual a la sumatoria de todos sus índices transformados dividido en la cantidad de censos realizados.

Cobertura de *Larrea divaricata* (%) =

$$37.5+62.5+37.5+87.5 / 4 = 50$$

Este procedimiento se realizará para todas las especies “censadas” en el lugar y así poder observar la importancia o contribución de cada una de ellas. Una vez efectuado este procedimiento el paso siguiente es darle un nombre a la comunidad o área homogénea. Si bien existen muchas nomenclaturas (formas de nombrar a las comunidades) de acuerdo a diversos autores, lo importante es que el nombre que le asignemos debe cumplir el requisito de que dicho nombre debe provenir del nombre científico de la/s especie/s más importante/s o característica/s (dominancia y/o co-dominancia) de la comunidad o área homogénea, es decir, no utilizar nombres comunes, locales o vulgares.

Por ejemplo:

a) “bosque de quebracho con arbustal continuo de jarilla y estrato herbáceo de gramíneas perennes muy discontinuo”.

b) “bosque de *Aspidosperma quebracho-blanco* con arbustal continuo de *Larrea divaricata* y estrato herbáceo de gramíneas perennes muy discontinuo”.

Sabemos que hay más de un “quebracho” en la provincia fitogeográfica chaqueña y que “jarilla” es utilizado en muchos casos para otras especies que no son del género *Larrea*.

Por otro lado, si realizáramos muchos censos en varias áreas homogéneas (incluso más de uno por área) podríamos construir un Tabla Fitosociológica. En ésta, al igual que en el ejemplo anterior, en las columnas se colocan los Censos y en las filas las Especies y se realizan comparaciones a través del procedimiento de “mover” filas y columnas sin alterar la ubicación del valor del índice (“casillero”) de cada especie y del censo en el cual fue registrada. El objetivo de éste proceso es simplemente observar la existencia o no de diferencias entre especies y censos. Es decir comprobar la existencia de lo que nosotros a priori consideramos áreas homogéneas diferentes. ☑

6. ANÁLISIS DE DATOS Y BASE CONCEPTUAL

6.a. Vegetación ¿Stand o continuum?

Es conocido que los estudios de vegetación se realizan principalmente desde dos diferentes puntos de vista que manifiestan distintos pensamientos sobre las comunidades: a) la visión orgánica de Clements (la vegetación - comunidades vegetales- se distribuyen en unidades claramente reconocibles y bien definidas en el espacio) y b) la visión de continuo de Gleason de que las especies se distribuyen independientemente entre sí, de acuerdo a factores ambientales. Si queremos complejizar un poco más, Whittaker sobre la base de ésta hipótesis (visión de Gleason), es quien desarrolla el estudio de la vegetación en los denominados gradientes. Es decir, no reconociendo a la comunidad vegetal (visión de Clements), sino estudiando la estructura y la variación (cambios) de la vegetación en función de gradientes de factores ambientales (o antrópicos). Mucho se ha discutido y se discute actualmente sobre cómo se distribuye o como es la repuesta de la vegetación (especies) a los cambios que sin dudas ocurren en el medio ambiente. Planteamiento de preguntas como ¿forman las especies agrupaciones reconocibles o bien definidas que aparecen y desaparecen en un gradiente? (Figura 38, izquierda); o ¿en forma independiente cada especie responde a los cambios ambientales? (Figura 38, derecha).

¿Por qué deberíamos tener en cuenta esto? Esto es importante para ayudarnos en los análisis de datos extraídos. Por ejemplo, si nuestro enfoque fuese orgánico la herramienta o forma de analizar nuestros datos es la “clasificación” (cluster). Mediante éste análisis se “agrupan” los lugares muestreados (comunidades correspondientes a sitios discretos como por ejemplo tipos de suelos diferentes con límites claramente detectables desde sensores remotos satelitales, Figura 39) que comparten especies. Allí, es posible también observar lugares muestreados “confusos” (no correspondiente a grupos bien definidos) que posiblemente constituyan ecotonos o transiciones (Ej.: “mover” filas y columnas de los censos Braun-Blanquet). Por otro lado, si nuestro enfoque fuese de continuum la forma de analizar sería el de “ordenamiento” de los lugares muestreados en relación a uno o más ejes de variación

que aporten la máxima información de su composición (cambios de vegetación a lo largo de una pendiente pronunciada, o a lo largo de un gradiente de pastoreo con la distancia a la aguada, Figura 40). Sin embargo, éstas son dos técnicas complementarias; la “generalidad” es que los resultados a través de

técnicas “clasificación” se presentan en “tablas” y los de “ordenamiento” en “gráficos”, por ello en trabajos de vegetación se encuentran muchos casos en donde se presentan en forma combinada los resultados, ello es una forma de entender que ambas técnicas son complementarias. ☑

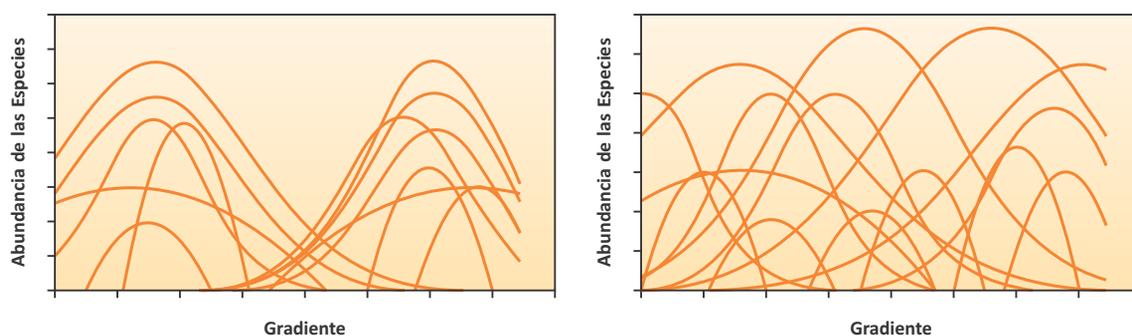
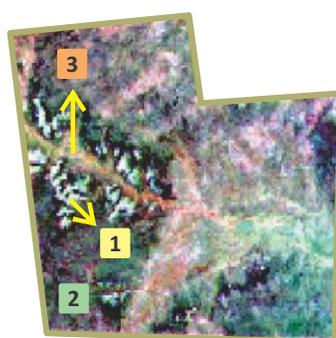


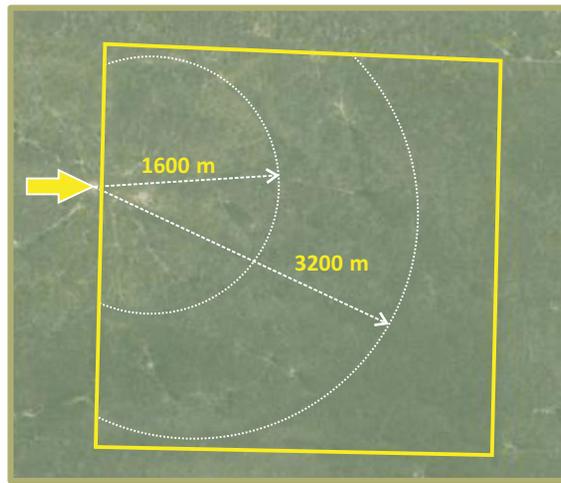
Figura 38. Distribución de especies en un gradiente ambiental (o antrópico) formando agrupaciones reconocibles (izquierda) o con comportamiento independiente (derecha).



- 1 - Afloramiento de cerrillos
- 2 - Loma
- 3 - Paleocauce

ESPECIE	c40	c43	c44	c15	c5	c9	c37	c18	c17	c26	c35	c19	c3	c10	c38	c16
Zucpun	5	2	4													
Lipint			2													
Acafur			2													
Mimcar				3	3	2	2	2	2	2						
Larcun					3	3	3	3	2	3	4					
Xerova								1				1	2	1	2	
Lardiv				1								3	3	2	1	3
Triusi				1								1				
Acaaro															2	2
Liptur																1
Lycten																
Aspque				3	2			2	3		1					
Corarg				3	1	1	2	2	3	1	2	1	2	1	2	1
Goupar							1								2	
Setpam								1		1	1					

Figura 39. Comunidades discretas en un potrero con tipos de suelos contrastantes. Se señalan en una escena Landsat 5 TM, 3 sitios contrastantes, afloramiento de cerrillos (1), loma (2) y paleocauce (3). La matriz de especies (filas) x censos (columnas) muestra la diferencias en las especies presentes en los censos correspondientes al sitio 1 (3 columnas amarillas), al sitio 2 (8 columnas verdes) y al sitio 3 (5 columnas naranjas). Nótese que los casilleros especie x censo correspondientes a cada sitio forman “bloques”.



ESPECIE (Nombre Científico)	FORMA DE VIDA	8	7	5	3	1	0,5
<i>Prosopis sericantha</i>	Arbusto						r
<i>Larrea cuneifolia</i>	Arbusto				3	4	3
<i>Opuntia sulphurea</i>	Arbusto				m	m	m
<i>Tephrocactus articulatus</i>	Arbusto			m	m	m	
<i>Capsicum chacoense</i>	Arbusto		m	m		m	
<i>Tricomaria usillo</i>	Arbusto	1	1	m	m		
<i>Morrenia brachystephana</i>	Arbusto	m	r	m			
<i>Cordobia argentea</i>	Arbusto	1	m	1			
<i>Maytenus vitis-idaea</i>	Arbusto		1		m		
<i>Moya spinosa</i>	Arbusto	r		m			
<i>Ximenia americana</i>	Arbusto			m			
<i>Lycium elongatum</i>	Arbusto		2	m			
<i>Mimosa detinens</i>	Arbusto		m	1			
<i>Amphilophium cynanchoides</i>	Arbusto		m				
<i>Cleistocactus baumannii</i>	Arbusto		r				
<i>Capparis atamisquea</i>	Arbusto	1	r				
<i>Ephedra triandra</i>	Arbusto	m					
<i>Condalia microphylla</i>	Arbusto	r					
<i>Portulaca umbraticola</i>	Hierba						
<i>Ayenia lingulata</i>	Hierba						
<i>Sida argentina</i>	Hierba						
<i>Justicia gilliesii</i>	Hierba						r
<i>Gomphrena tomentosa</i>	Hierba						m
<i>Portulaca sp</i>	Hierba					m	m
<i>Talinum polygaloides</i>	Hierba	r	r		m	1	m
<i>Bromelia urbaniana</i>	Hierba	m		m	m		
<i>Pseudabutilon pedunculatum</i>	Hierba	1		m			
<i>Tragia hieronymi</i>	Hierba	r	r				
<i>Sida dictyocarpa</i>	Hierba		r				
<i>Passiflora palmatisecta</i>	Hierba		r				
<i>Boerhavia diffusa</i>	Hierba		r				
<i>Digitaria californica</i>	Pasto	m					
<i>Chloris ciliata</i>	Pasto	m					
<i>Trichloris crinita</i>	Pasto	3	4	4	2	m	m
<i>Setaria pampeana</i>	Pasto	1	m	1	1	m	m
<i>Gouinia paraguayensis</i>	Pasto	2	r	1	m	1	

ESPECIE (Nombre Científico)	FORMA DE VIDA	8	7	5	3	1	0,5
<i>Sporobolus pyramidatus</i>	Pasto	r			1	2	2
<i>Pappophorum philippianum</i>	Pasto				1	m	m
<i>Microchloa indica</i>	Pasto				m	m	m
<i>Neobouteloua lophostachya</i>	Pasto					m	2
<i>Tripogon spicatus</i>	Pasto						m
<i>Aristida adscensionis</i>	Pasto						
<i>Bouteloua aristidooides</i>	Pasto						

Figura 40 (continuación página anterior). Cambio gradual de la vegetación en un potrero sin diferencias notables de suelo. La vegetación cambia gradualmente desde la aguada (flecha amarilla) hacia el fondo del potrero. Solo para facilitar estimaciones de receptividad se señalan áreas semicirculares discretas, hasta 1600 y 3200 m desde la aguada. En la matriz especies (filas) x censos (columnas) se observa claramente el gradiente de especies desde la aguada al fondo del potrero, tanto para arbustos (sector superior de la matriz), como para hierbas (sector medio de la matriz) y pastos (sector inferior de la matriz).

7. COMENTARIOS FINALES

Como se menciona con anterioridad y reiteradamente, actualmente muchos aspectos se siguen discutiendo sobre los estudios de vegetación, desde las metodologías adecuadas, pasando por los tipos de atributos hasta las formas de denominación de una comunidad vegetal determinada. Si tuviéramos que escribir un capítulo bien detallado sobre evaluación de vegetación deberíamos alcanzar niveles de profundidad superiores al requerido para los fines de este manual. Otro aspecto fundamental es ser coherentes en la cantidad de observaciones (censos) y los atributos a estimar en relación al objetivo del estudio, para ser eficientes en el uso de los recursos disponible (especialmente el tiempo). Así:

“..... resulta tan ineficiente aplicar técnicas complejas y costosas a datos provenientes de un muestreo ineficiente, como recopilar datos con técnicas o métodos complejos y costosos para luego analizarlos con la ayuda de métodos que desaprovechan gran parte de la información suministrada por los datos” Mateucci y Colma (1982).

“..... existe muy poca tendencia hacia la estandarización de los métodos usados en el análisis de la vegetación, ésta diferencia en opinión es debido a los objetivos de estudio, también puede ser a causa de que a todas las plantas no se les puede aplicar una misma técnica de inventario” Daubenmire (1959). ☑

8. BIBLIOGRAFÍA

- ☐ **Bonham, C. D., 1989.** Measurements for Terrestrial Vegetation. John Wiley and Sons, New York, USA, p. 352.
- ☐ **Braun-Blanquet, J. 1932.** Plant Sociology: the Study of Plant Communities. McGraw-Hill, New York and London, 438 pp.

- ☐ **Braun-Blanquet, J. 1979.** Fitosociología, bases para el estudio de las comunidades vegetales. 820 pp. H. Blume Ediciones, Barcelona.
- ☐ **Clements, F. E. 1916.** Plant succession: an analysis of the development of vegetation. Publications Carnegie Institute, Washington 242: 1-512.
- ☐ **Clements, F. E. 1928.** Plant Succession and Indicators. Wilson, New York. 453 p.
- ☐ **Gleason, H. A. 1926.** The individualistic concept of the plant association. Bulletin Torrey Botanical Club 53: 7-26.
- ☐ **Whittaker, R. H. 1967.** Gradient analysis of vegetation. Biological Reviews 42: 207-264.
- ☐ **Whittaker, R. H. 1973.** Ordination and classification of communities. Dr. W. Junk Publishers, The Hague. 737pp.
- ☐ **Daubenmire, R. 1959.** A canopy-coverage method of vegetational analysis. Northwest Sci. 33: 43-64.
- ☐ **Daubenmire, R. 1968.** Plant communities. Harper and Row, New York.
- ☐ **Evans, R. A. and R. M. Love. 1957.** The step-point method of sampling - A practical tool in range research. J. Range Manage. 10: 208-212.
- ☐ **Matteucci, D. S. y A. Colma. 1982.** Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Washington, D. C. 168p.
- ☐ **Mueller-Dombois, D. and Ellenberg, H. 1974.** Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley and Sons, New York. ☑



CAPÍTULO III: ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD FORRAJERA

Emiliano Quiroga¹, Armando Ricarte², Pedro Namur (h)², Raul Diaz² y Luis Guzmán²
(1: INTA EEA Catamarca - 2: INTA EEA La Rioja)

1. INTRODUCCIÓN

Para poder realizar un pastoreo sustentable es importante que la carga animal se condiga con la oferta de forraje del área a pastorear. Por ende, conocer la productividad forrajera de un área nos posibilita estimar su “capacidad de carga” o receptividad, que es una medida de cuanto superficie hace falta para soportar una unidad ganadera.

Existen diversos métodos de estimación de la productividad forrajera aplicables a campos naturales (pastizales naturales) y pasturas implantadas. El método de referencia es el “de la cosecha”. Este método ha resultado particularmente adecuado para estimar la productividad forrajera de plantas herbáceas (Singh *et al.*, 1975). En este capítulo se presentarán además, dos modificaciones de este método, desarrolladas para disminuir el tiempo y esfuerzo en el muestreo (método “del doble muestreo”; Pechanec y Pickford 1937, Wilm *et al.*, 1944) y además, para permitir su aplicación en sistemas en que deseamos estimar la productividad de plantas leñosas (método “del prisma”; Biurrun y Ricarte 2011).

A continuación se explicará cada uno de estos tres métodos, luego se hará una descripción esquemática comparativa de los mismos, y se finalizará con una descripción más detallada de los pasos a seguir y que son comunes en la aplicación de los tres métodos. ☑

2. MÉTODO “DE LA COSECHA”

Se basa en realizar cortes del forraje que ha crecido en sectores del campo en que se ha permitido la acumulación de biomasa aérea de las plantas forrajeras durante la última estación de crecimiento. Para ello, los cortes se realizan al final de la época de crecimiento de la vegetación (pico de la acumulación de biomasa, Singh *et al.*, 1975), a partir de marcos de muestreo que se distribuyen representativamente en el área de interés, comúnmente en transectas. El material cosechado es secado y pesado; y la productividad forrajera se expresa comúnmente en kilogramos de materia seca por hectárea (kg ms/ha).

Este método ha sido tradicionalmente el más usado porque las cantidades de biomasa aérea cosechada brindan una estimación directa del objetivo de estudio, la producción anual de forraje. Dadas sus características, ha resultado particularmente adecuado para medir la productividad de pastos y demás plantas herbáceas (Sala y Austin 2000). Las ventajas del método son su sencillez y su confiabilidad, dado que las mediciones brindan una estimación directa de la cantidad de forraje. La desventaja es que es un método demandante en mano de obra y tiempo. Los pasos y consideraciones generales para aplicar éste y los demás métodos abordados en esta guía se detallarán más abajo. ☑

3. MÉTODO DEL “DOBLE MUESTREO”

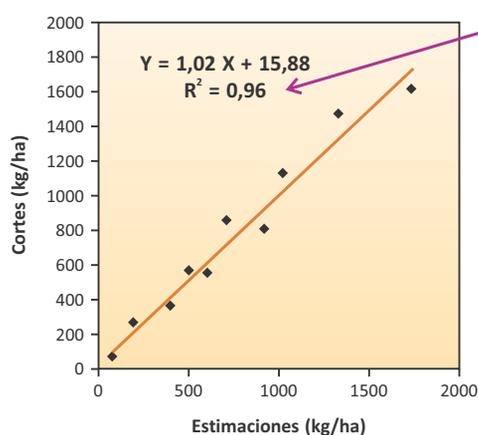
El método del doble muestreo, aplicado a la productividad de forraje, fue desarrollado antes de mediados del siglo pasado (Pechanec y Pickford 1937, Wilm *et al.*, 1944) como una alternativa rápida y de menor esfuerzo que el método tradicional de la cosecha. El método se implementa como una modificación del método tradicional de la cosecha, haciendo los cortes en solo una fracción de los marcos de muestreo (generalmente 1 marco de cada 5 o 10 marcos), y realizando estimaciones visuales de la cantidad de biomasa en la totalidad de dichos marcos. Luego, en gabinete, se realiza análisis de regresión lineal para determinar la relación entre los valores estimados visualmente en los marcos y los obtenidos mediante corte, secado y pesado. La ecuación de regresión obtenida se usa para corregir posibles diferencias surgidas entre las estimaciones visuales y las cosechas de los marcos (Wilm *et al.*, 1944, Tadmor *et al.*, 1975). Idealmente, las estimaciones visuales deben abarcar el rango de valores de biomasa encontrados en el área de interés. Al igual que el método de la cosecha, éste método también ha mostrado ser particularmente útil para medir la productividad de pastos y otras plantas herbáceas, haciéndose algo más dificultosa su aplicación

para especies leñosas. Las ventajas de rapidez y menor esfuerzo del método son en parte contrapuestos por la necesidad de cierta destreza de los operarios para realizar las estimaciones visuales y conocimientos para el procesamiento de datos.

En resumen, los pasos generales que se siguen para realizar el doble muestreo son básicamente los mismos que para el método tradicional de la cosecha. La diferencia (mencionada anteriormente) es que se reemplaza el corte de algunos marcos por estimaciones visuales de la cantidad de forraje, y en la parte final de procesamiento de los datos se aplica análisis de regresión lineal (en una planilla de cálculo de Excel o programa similar, como se muestra en la Figura 41) para corregir posibles imprecisiones en las estimaciones visuales. ☑

PASOS DEL PROCESAMIENTO DE DATOS PARA CADA TRANSECTA O UNIDAD HOMOGÉNEA:

- 1) Pasar datos de marcos que se cortaron y estimaron a la vez.
- 2) Obtener la ecuación de regresión (cortado = Y, estimado = X). R^2 debe ser mayor a 0,80
- 3) Obtener el promedio de todos los marcos estimados.
- 4) Corregir los valores estimados usando la ecuación de regresión obtenida en (2).



682 Promedio Corregido

653 Promedio de Estimaciones

MARCO	CORTADO (kg/ha)	ESTIMADO (kg/ha)
1	250	200
2	550	600
3	1130	1000
4	1620	1700
5	50	80
6	810	900
7	360	400
8	1480	1300
9	560	500
10	850	700
11		200
12		350
13		800
14		1500
15		1100
16		360
17		800
↓	↓	↓
39		1100
40		360
41		800
42		200
43		60
44		90
45		1850
46		30
47		650
48		300
49		900
50		580

Figura 41. Ejemplo del procesamiento de los datos obtenidos mediante el método de “doble muestreo” para un caso en que se estimaron visualmente 50 marcos de los cuales se cortaron, pesaron y secaron 10. Por simplicidad se cargaron en las primeras filas los datos de aquellos marcos que además de estimarse visualmente se cortaron.

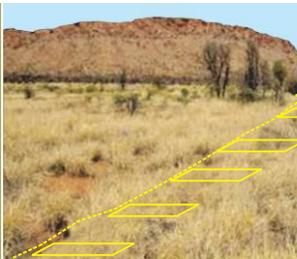
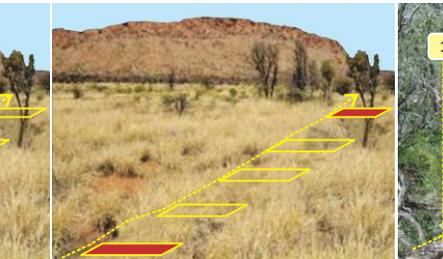
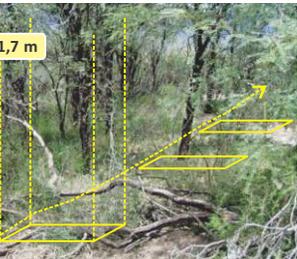
Para que la ecuación de regresión resulte adecuada, se requiere cierto nivel de coherencia en las estimaciones, que se puede evaluar según el nivel de ajuste entre los datos “estimados” y los “medidos” (se debe alcanzar un $R^2 \geq 0,75-0,80$). También es deseable que las estimaciones sean precisas, es decir que la ecuación presente pendiente próxima a 1 y ordenada al origen cercana a 0. ☑

4. MÉTODO DE LA COSECHA ADAPTADO PARA INCLUIR LEÑOSAS, O MÉTODO DEL “PRISMA”

Esta adaptación al método tradicional “de la cosecha” fue propuesta por Ricarte y Biurrun (2011), para incluir, además de las especies herbáceas, a las especies leñosas. Esto es fundamental en sistemas ganaderos que incluyen animales que basan gran parte de su dieta en este componente de la vegetación (por ejemplo caprinos). La

modificación realizada al método de cosecha, consiste en medir no solo la biomasa de plantas herbáceas por cortes al ras del suelo en marcos de medición, si no también realizar la proyección vertical de cada marco de muestreo hasta una altura de 1,7 m (lo que alcanza una cabra en posición bipedal) y cosechar todos los brotes y/o frutos del año de los arbustos considerados forrajeros que quedaron incluidos en el volumen de ese prisma. Además, se debe coleccionar la hojarasca que haya sido producida durante la última estación de crecimiento y que haya caído dentro del marco. Para facilitar la visualización del volumen del prisma a muestrear se usa una varilla metálica de 1,7 m que se coloca en posición vertical en un ángulo del marco de muestreo colocado en el piso. ☑

5. ESQUEMA COMPARATIVO DE LOS 3 MÉTODOS

ETAPA	MÉTODO DE LA COSECHA	MÉTODO DEL DOBLE MUESTREO	MÉTODO DEL PRISMA
A) DETERMINACIÓN ÁREAS HOMOGÉNEAS			
B) DISEÑO DEL MUESTREO		 <p>A) Distribución de las transectas B) Longitud y N° marcos por transecta</p>	
C) MUESTREO A CAMPO	 <p>Cortes de herbáceas en todos los marcos.</p>	 <p>Estimación visual de especies herbáceas en todos los marcos. Corte en 1 marco de cada 5 ó 10 marcos.</p>	 <p>Cortes de herbáceas que enraízan en cada marco. Corte de brotes del año de leñosas que proyectan cobertura al volumen de cada prisma.</p>

ETAPA	MÉTODO DE LA COSECHA	MÉTODO DEL DOBLE MUESTREO	MÉTODO DEL PRISMA
D) PROCESAMIENTO DE MUESTRAS	A) Secado del material cosechado en cada marco en estufa a 60-70°C por 48-72 hs. B) Pesado de las muestras.		
E) TRABAJO DE GABINETE	Cálculo de la producción forrajera de herbáceas (kg.MS/ha).	A) Análisis de regresión lineal: Estimado visualmente (X) vs. Cortes (Y) B) Corrección de las estimaciones visuales con la ecuación de regresión. C) Cálculo de la producción forrajera de herbáceas (kg.MS/ha).	Cálculo de la producción forrajera de herbáceas y leñosas (kg.MS/ha).

6. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS COMUNES A SEGUIR PARA LLEVAR ADELANTE CADA MÉTODO DE MUESTREO

6.a. Determinación de áreas homogéneas

Para el fin que perseguimos, un área homogénea se define como el sector de campo con características similares respecto de los factores que influyen en la productividad de forraje. Por ello, para la determinación de áreas homogéneas, se deben tener en cuenta el tipo de vegetación, posibles efectos de gradientes ambientales o de pastoreo, posición topográfica, estado de conservación/degradación, etc.

Para la determinación de áreas homogéneas nos valemos de herramientas que posibilitan la visualización general del área de interés, como Google Earth, fotos aéreas o imágenes satelitales. Lo que se visualiza mediante estas herramientas se debe corroborar en base a recorridos de campo.

Es importante considerar que para medir la productividad forrajera (cantidad de forraje producida en un año), el área muestrear no debe haber sido pastoreada durante la última estación de crecimiento. Por ello, si se trabajará en potreros o campos que están bajo pastoreo, deberemos instalar clausuras temporarias que se colocan al inicio de la estación de crecimiento, a las que se regresa para realizar el muestreo al finalizar dicho período.

6.b. Diseño del muestreo

En esta etapa definimos cuantas transectas realizaremos en cada área homogénea. En cada área, para representarla mejor, podemos realizar una transecta larga que la atraviese su heterogeneidad interna o varias transectas más cortas ubicadas en lugares estratégicos. También

definiremos cuantos marcos mediremos por transecta y área homogénea. Generalmente se enfrenta un compromiso entre representar cada área de la manera más fiel posible y la cantidad de trabajo y costos de muestreo que podemos afrontar.

Con la siguiente fórmula se determina el número de muestras necesarias por área homogénea:

$$N = (t^2 \times S^2) / A^2$$

Donde:

N = número de muestras a tomar

t = valor de la tabla de t de Student

A = valor igual al 10% del promedio de los datos

S² = varianza

La varianza se calcula:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Donde el numerador de la ecuación incluye la resta de cada valor de productividad forrajera (xi) menos el promedio de los datos de productividad del área homogénea (\bar{x}) y el denominador es el número de marcos estimados para esa área homogénea (n) menos uno. Ejemplo:

MUESTRAS	X _i	X _i - \bar{X}	(X _i - \bar{X}) ²
1	30	-11.67	136.1
2	35	-6.67	44.4
3	40	-1.67	2.8
4	45	3.33	11.1
5	50	8.33	69.4
6	50	8.33	69.4
\bar{X}	41,67		
Sumatoria			333,3

El valor de t para 6 muestras con 95% de probabilidad se encuentra en la Tabla de Distribución de "t" (Figura 42) buscando la intersección de la fila correspondiente a 5 grados de libertad (6-1 = 5) con la columna encabezada con el número "0,95"; el valor situado en esa ubicación es 2,02.

$$t^2 = 2,022 = 4,08 \quad | \quad \bar{X} = 250/6 = 41,67 \quad | \quad A = \text{es el } 10\% \text{ de } \bar{X} = 41,67 \times 0,1 = 4,167 \quad A^2 = 4,167^2 = 17,36$$

$$S^2 = 333,3/(6-1) = 66,67 \quad (\text{en Excel se calcula con: } = \text{VAR}(X1:X6)) \quad | \quad N = (4,08 \times 66,67)/17,36 = 15,7$$

	1 cola	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
2 colas	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
t	0,995	0,99	0,985	0,98	0,975	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	
1	63,66	31,82	21,20	15,89	12,71	6,31	3,08	1,96	1,38	1,00	0,73	0,51	0,32	0,16	0,00	
2	9,92	6,96	5,64	4,85	4,30	2,92	1,89	1,39	1,06	0,82	0,62	0,44	0,29	0,14	0,00	
3	5,85	4,54	3,90	3,48	3,18	2,35	1,64	1,25	0,98	0,76	0,58	0,42	0,28	0,14	0,00	
4	4,60	3,75	3,30	3,00	2,78	2,13	1,53	1,19	0,94	0,74	0,57	0,41	0,27	0,13	0,00	
5	4,03	3,36	3,00	2,76	2,57	2,02	1,48	1,16	0,92	0,73	0,56	0,41	0,27	0,13	0,00	
6	3,71	3,14	2,83	2,61	2,45	1,94	1,44	1,13	0,91	0,72	0,55	0,40	0,26	0,13	0,00	
7	3,50	3,00	2,71	2,52	2,36	1,89	1,41	1,12	0,90	0,71	0,55	0,40	0,26	0,13	0,00	
8	3,36	2,90	2,63	2,45	2,31	1,86	1,40	1,11	0,89	0,71	0,55	0,40	0,26	0,13	0,00	
9	3,25	2,82	2,57	2,40	2,26	1,83	1,38	1,10	0,88	0,70	0,54	0,40	0,26	0,13	0,00	
10	3,17	2,76	2,53	2,36	2,23	1,81	1,37	1,09	0,88	0,70	0,54	0,40	0,26	0,13	0,00	
11	3,11	2,72	2,49	2,33	2,20	1,80	1,36	1,09	0,88	0,70	0,54	0,40	0,26	0,13	0,00	
12	3,05	2,68	2,46	2,30	2,18	1,78	1,36	1,08	0,87	0,70	0,54	0,39	0,26	0,13	0,00	
13	3,01	2,65	2,44	2,28	2,16	1,77	1,35	1,08	0,87	0,69	0,54	0,39	0,26	0,13	0,00	
14	2,98	2,62	2,41	2,26	2,14	1,76	1,35	1,08	0,87	0,69	0,54	0,39	0,26	0,13	0,00	
15	2,95	2,60	2,40	2,25	2,13	1,75	1,34	1,07	0,86	0,69	0,54	0,39	0,26	0,13	0,00	
16	2,92	2,58	2,38	2,24	2,12	1,75	1,34	1,07	0,86	0,69	0,54	0,39	0,26	0,13	0,00	
17	2,90	2,57	2,37	2,22	2,11	1,74	1,33	1,07	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
18	2,88	2,55	2,36	2,21	2,10	1,73	1,33	1,07	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
19	2,86	2,54	2,35	2,20	2,09	1,73	1,33	1,07	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
20	2,85	2,53	2,34	2,20	2,09	1,72	1,33	1,06	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
21	2,83	2,52	2,33	2,19	2,08	1,72	1,32	1,06	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
22	2,82	2,51	2,32	2,18	2,07	1,72	1,32	1,06	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
23	2,81	2,50	2,31	2,18	2,07	1,71	1,32	1,06	0,86	0,69	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
24	2,80	2,49	2,31	2,17	2,06	1,71	1,32	1,06	0,86	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
25	2,79	2,49	2,30	2,17	2,06	1,71	1,32	1,06	0,86	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
26	2,78	2,48	2,30	2,16	2,06	1,71	1,31	1,06	0,86	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
27	2,77	2,47	2,29	2,16	2,05	1,70	1,31	1,06	0,86	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
28	2,76	2,47	2,29	2,15	2,05	1,70	1,31	1,06	0,85	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
29	2,76	2,46	2,28	2,15	2,05	1,70	1,31	1,06	0,85	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
30	2,75	2,46	2,28	2,15	2,04	1,70	1,31	1,05	0,85	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
40	2,70	2,42	2,25	2,12	2,02	1,68	1,30	1,05	0,85	0,68	0,53	0,39	0,26	0,13	0,00	
50	2,68	2,40	2,23	2,11	2,01	1,68	1,30	1,05	0,85	0,68	0,53	0,39	0,25	0,13	0,00	
100	2,63	2,36	2,20	2,08	1,98	1,66	1,29	1,04	0,85	0,68	0,53	0,39	0,25	0,13	0,00	
200	2,60	2,35	2,19	2,07	1,97	1,65	1,29	1,04	0,84	0,68	0,53	0,39	0,25	0,13	0,00	
300	2,59	2,34	2,18	2,06	1,97	1,65	1,28	1,04	0,84	0,68	0,52	0,39	0,25	0,13	0,00	
400	2,59	2,34	2,18	2,06	1,97	1,65	1,28	1,04	0,84	0,68	0,52	0,39	0,25	0,13	0,00	
1000	2,58	2,33	2,17	2,06	1,96	1,65	1,28	1,04	0,84	0,67	0,52	0,39	0,25	0,13	0,00	
10000	2,58	2,33	2,17	2,05	1,96	1,65	1,28	1,04	0,84	0,67	0,52	0,39	0,25	0,13	0,00	
100000	2,58	2,33	2,17	2,05	1,96	1,64	1,28	1,04	0,84	0,67	0,52	0,39	0,25	0,13	0,00	
1000000	2,58	2,33	2,17	2,05	1,96	1,64	1,28	1,04	0,84	0,67	0,52	0,39	0,25	0,13	0,00	

Figura 42. Tabla de Distribución "t" de Student (Probabilidades acumuladas a diferentes grados de libertad). Tabla diseñada por el Ing. M.Sc. Martín Matas.

Este resultado ($N = 15,7$) significa que se deben tomar diez muestras más para poder estimar la cantidad de forraje con una confianza del 95% y un error de hasta 10%. También se puede estimar el número muestral a través de software como por ejemplo G-Power (<http://www.gpower.hhu.de/>).

6.c. Muestreo de campo

Independientemente del método a seguir (ej.: método de la cosecha, doble muestreo, del prisma, etc.), cuyas particularidades fueron expuestos previamente, existen consideraciones que son válidas para los distintos métodos:

> **Formas del marco de muestreo:** Existe una polémica acerca de la forma del marco. Algunos recomiendan reducir la relación borde-superficie para disminuir los errores de borde (p.e. ¿la planta está adentro o afuera del marco?). Por lo tanto, en primer lugar, el marco ideal sería el circular, luego el marco con forma de cuadrado y finalmente el rectangular. Sin embargo, a pesar de lo anterior, algunos investigadores prefieren marcos angostos y rectangulares porque con ellos se obtienen muestras más representativas de lo que muestrean. En síntesis, no existe una forma (ni tamaño) de marco única que resulte mejor en todos los ambientes. Por ejemplo, para nuestra región (Chaco Árido) los marcos rectangulares (con un lado libre, ver Figura 43) resultan muy prácticos.

> **Tamaño del marco de muestreo:** De todos modos, más importante que la forma, es la superficie del marco de muestreo. Cuando más pequeño sea, mayor será el error de borde. Para nuestra región, hemos encontrado que un tamaño razonable es el de $0,5 \text{ m}^2$ (dimensiones: $1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$; Figura 43). Este tamaño ha resultado ser operativo incluso para usarse en el método “del prisma”, dado que marcos de tamaños mayores dificultaban el desplazamiento dentro del monte.

> **Cortes:**

1) Herbáceas: Para estandarizar las estimaciones, es conveniente realizar los cortes a la misma altura, al ras del suelo, o lo más cerca del suelo posible. Se debe descartar todo material viejo que haya sido producido con anterioridad al último período de crecimiento (en pastos, visible por tener un color grisáceo).

2) Leñosas: Los cortes para estimar productividad forrajera deben realizarse sobre los brotes que han crecido durante la última estación de crecimiento. Las muestras cortadas pueden ser colocadas en bolsas de papel o tela con su respectiva identificación.

> **Clausura:** Como se mencionó anteriormente, para asegurar que se estima la productividad de forraje del último período de crecimiento, el sector a muestrear no debe haber sufrido pastoreo durante dicho período, o de lo contrario debería haberse instalado al inicio de la época de crecimiento una/s clausura/s para impedir que

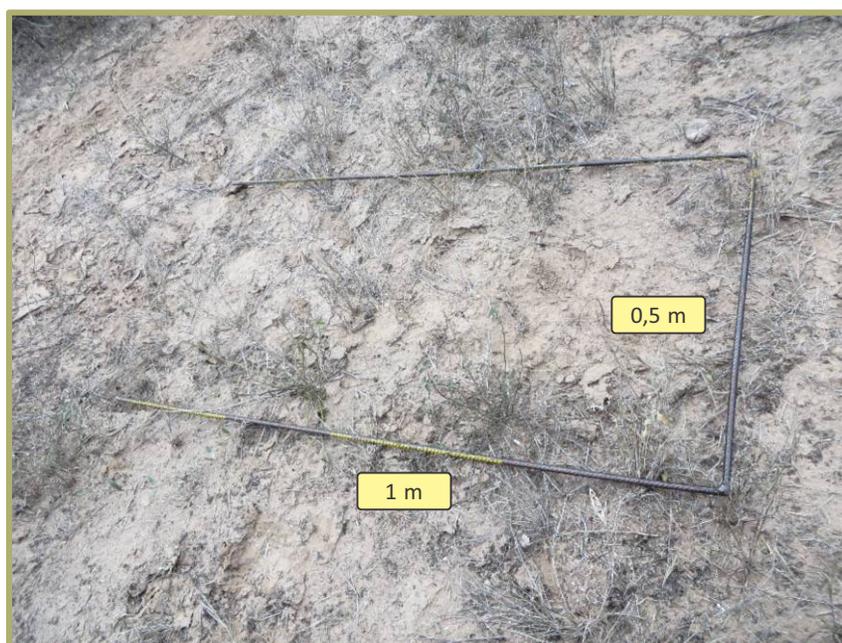


Figura 43. Ejemplo de marco construido con hierro del 8", construido sin uno de sus lados para poder introducir el marco de manera más fácil en la pastura/pastizal/monte.

el ganado consume nuestro objetivo de medición. La forma, tamaño y cantidad de clausuras a utilizar en cada área homogénea puede variar según las características de la vegetación y según nuestra conveniencia. En general pastizales homogéneos podrán representarse suficientemente bien con clausuras pequeñas (25 a 50 m²), mientras que arbustales o bosques requerirán tamaños mayores de clausuras para contemplar su variabilidad espacial interna.

> **Época de cosecha:** Debido a la estacionalidad del crecimiento de la vegetación, conviene realizar la cosecha al finalizar la etapa reproductiva de las plantas forrajeras, que coincide con el momento de máxima acumulación de forraje, a fines de Marzo o Abril para la región del Chaco Árido.

> **Distancia mínima de áreas de disturbio:** Los caminos internos constituyen áreas que facilitan el desplazamiento y acceso de los animales por lo que suelen mostrar patrones de vegetación poco representativos al resto del campo. Por lo que se sugiere comenzar los muestreos a distancias mayores de 50 metros de los caminos o alambrados de tránsito frecuente del ganado.

6.d. Secado de muestras y pesado

Luego del corte las muestras deben colocarse en estufa para su secado. El tiempo de secado dependerá del estado fenológico del pastizal, el secado se realizará hasta peso constante, por lo general esto se logra luego de 48 horas de secado a temperaturas de entre 60 y 70°C.

En cuanto al tipo de estufa, existen dos mecanismos de secado, una por secado convencional y otras por aire forzado. Dependiendo del objetivo, por ejemplo, si es solo para estimación de productividad para ajustar la carga animal se puede utilizar estufa por secado convencional. Pero si se necesita luego estimar parámetros de calidad se utilizará por aire forzado, debido a que la convencional suele desnaturalizar las proteínas y puede conducir a una estimación errónea los parámetros de calidad.

6.e. Trabajo de gabinete

Una vez secada la muestra se debería pesar con balanza de precisión = 1 gramo, descontando el peso de la bolsa, y luego multiplicando por 20 el valor del peso en gramos, en el caso de utilizar un marco de 0,5 m², para obtener el valor en kg.MS/ha. Las muestras de cada transecta, y luego los valores medios de las transectas dentro de cada área homogénea se promedian para obtener un valor representativo de la misma.

Suponiendo que un potrero dado posee un 80% de su superficie correspondiente al área homogénea A y el 20% restante corresponde al área homogénea B.

El cálculo de la productividad total del potrero será:

Productividad del potrero (kg.MS/ha) =

(Productividad área A * proporción de superficie del potrero con área A) + (Productividad área B * proporción de superficie del potrero con área B). ☑

7. BIBLIOGRAFÍA

- ☐ **Pechanec, J. F., & Pickford, G. D. (1937).** A weight estimate method for determination of range or pasture production. *Journal of the American Society of Agronomy*, 29: 894-904.
- ☐ **Ricarte, A., Biurrun, F. (2011).** Metodología para evaluar la productividad forrajera de plantas leñosas. *Comunicación. Revista Argentina de Producción Animal*, vol. 31(1), pág. 542.
- ☐ **Sala, O. E., & Austin, A. T. (2000).** Methods of estimating aboveground net primary productivity. In *Methods in ecosystem science* (pp. 31-43). Springer New York.
- ☐ **Singh, J. S., Lauenroth, W. K., & Steinhorst, R. K. (1975).** Review and assessment of various techniques for estimating net aerial primary production in grasslands from harvest data. *The Botanical Review*, 41(2): 181-232.
- ☐ **Tadmor, N. H., Brieghet, A., Noy-Meir, I., Benjamin, R. W., & Eyal, E. (1975).** An evaluation of the calibrated weight-estimate method for measuring production in annual vegetation. *Journal of Range Management*, 28: 65-69.
- ☐ **Wilm, H. G., Costello, D. F., & Klipple, G. E. (1944).** Estimating forage yield by the double-sampling method. *Journal of the American Society of Agronomy*, 36: 194-203. ☑



CAPÍTULO IV: PRESUPUESTACIÓN FORRAJERA

Roxana Ávila y Carlos Ferrando (INTA EEA La Rioja)

1. INTRODUCCIÓN

La planificación forrajera puede definirse como el ordenamiento secuencial futuro de los recursos forrajeros de un establecimiento agropecuario dedicado a la producción animal. Su objetivo principal es tratar de lograr una óptima relación entre la producción de forraje y los requerimientos de las distintas categorías animales del rodeo, a través del año.

Una adecuada planificación requiere conocer la receptividad ganadera (capacidad de carga) del establecimiento. La misma puede definirse como la densidad máxima de animales que puede ser mantenida en un área determinada en un cierto nivel de producción sin deteriorar el recurso (Holechek *et al.*, 1989). Este concepto no es sinónimo de carga animal, ya que la carga en un momento determinado puede ser mayor, igual o menor a la receptividad. Entonces, la carga animal puede definirse como el número de animales expresados en unidades ganaderas en un área y en un tiempo específico. La receptividad de un sistema dado cambia a medida que varía la disponibilidad de recursos forrajeros, ligado a la variación en la disponibilidad de agua entre meses y años, y la eficiencia de uso de los recursos por parte de los animales, ligado a edad, sexo y estado fisiológico de los mismos (Golluscio, 2009). ☑

2. FACTORES DETERMINANTES

A continuación haremos referencia a los distintos factores que deben tenerse en cuenta en el proceso de planificación de los recursos forrajeros de un establecimiento:

> Sistema Productivo

En este caso debe considerarse si se trata de un sistema de cría, cría y recría, invernada o sistema completo. También debe tenerse en cuenta si son sistemas puros o mixtos (una especie animal o varias, ej. bovinos, bovinos-caprinos, bovinos-ovinos, etc.).

> Oferta Forrajera Útil (OFU)

Es la disponibilidad de forraje (pastura, pastizal) menos la fracción que se plantea no utilizar. Para establecer dicha fracción puede definirse un factor de uso o una eficiencia de cosecha de cada recurso. Otros factores que limitan la oferta forrajera son la distancia a la aguada y la pendiente del terreno, por ello debe aplicarse un factor de corrección que contemple estas limitaciones.

> Demanda Forrajera (DF)

Es la cantidad de forraje en kg de materia seca que demanda un animal por un periodo de tiempo. Esta demanda está constituida por el consumo propiamente

dicho, más la fracción de forraje desperdiciado durante el pastoreo. La demanda está relacionada con la categoría animal y la edad del animal. ☑

3. CÁLCULO DE LA OFERTA FORRAJERA ÚTIL

Debemos tener en cuenta lo siguiente:

- Definir de los recursos forrajeros con los cuales se trabajará. Por ej. pastizal natural y buffel grass.
- Definir las especies y/o categorías animales que se utilizarán y del tiempo durante el cual se utilizará cada recurso.
- Estimar la disponibilidad forrajera de cada recurso. Esto puede realizarse a través de diferentes métodos (consultar otra sección del manual). En el caso del pastizal natural deben delimitarse áreas homogéneas y obtener una estimación de la disponibilidad en cada una de ellas.
- Definir factor de uso. Se considera que los animales sólo deben consumir parte del pasto disponible para no comprometer la vida de las plantas, no sobrepastorear y mantener el recurso en el tiempo. Holechek (1988) señala que pastizales de zonas áridas (menos de 300 mm de precipitaciones) pueden resistir un uso de 25-35%, los pastizales con un régimen pluviométrico entre 300-600 mm un uso de 35-45%, mientras que los pastizales de zonas húmedas soportarían usos de 45-60%.
- Contemplar factores de reducción. La distancia a la aguada y la pendiente del terreno son dos factores que deben tenerse en cuenta en la estimación del forraje útil, ya que en algunas áreas puede implicar la reducción de hasta el 100% de la oferta forrajera. Algunos valores que permiten ajustar la oferta por los factores mencionados se muestran en las siguientes tablas:

Distancia a la aguada	Porcentaje de reducción de la OU
0 - 2500 m	No reducción
2501 - 5000 m	50 % reducción
> 5000 m	100 % reducción

Pendiente	Porcentaje de reducción de la OU
0 - 10 %	No reducción
11 - 30 %	30 % reducción
31 - 60 %	60 % reducción
> 60 %	100 % reducción

Fuente: Holechek et al., (1989).

4. CÁLCULO DE LA DEMANDA FORRAJERA

Debemos tener en cuenta lo siguiente:

- Definir composición del rodeo y/o majada. Debemos tener en cuenta cada una de las categorías animales que componen el rodeo y/o majada, dado que las mismas por edad o estado fisiológico presentan diferentes requerimientos energéticos/proteicos, y por lo tanto, diferentes demandas de forraje.
- Definir consumo de cada especie y/o categoría animal para cada período del año. La demanda de forraje (DF) está definida por el consumo animal en un periodo determinado más el forraje que se pierde durante el proceso de pastoreo. Por lo tanto:

$$DF = \text{Consumo} + \text{Desperdicio}$$

Las pérdidas durante el pastoreo están relacionadas al pisoteo de los animales, pérdidas por orina y defecación. Se estima que las pérdidas pueden estar en el orden del 10 al 30% (Smart et al., 2010). De acuerdo con esto, el desperdicio entonces será el resultado de:

$$\text{Desperdicio} = \text{Consumo} \times \text{Factor}$$

$$(\text{Factor} = 0,1; 0,2; 0,3)$$

El consumo voluntario de un animal depende de factores dependientes del animal (capacidad de ingestión) como de factores dependientes del alimento (ingestibilidad del forraje).

$$\text{Consumo} = \text{Capacidad de Ingestión} \times \text{Ingestibilidad}$$

La capacidad de ingestión es la cantidad de alimento que puede ingerir un animal y es independiente del alimento que se trate. Esta capacidad está directamente relacionada con el tamaño del animal, el cual a su vez depende de la edad y el genotipo. Si bien el peso es un buen indicador de tamaño, está influenciado por el estado corporal. Por lo tanto, el peso será buen indicador de tamaño cuando se comparen animales de similar estado corporal. Una forma de realizar esta comparación, es ajustar el peso real de los animales a un mismo estado corporal, la ecuación propuesta para ello es la siguiente:

$$\text{Peso aj} = \text{Peso actual} / 1 - (7 - \text{CC actual}) * 0,05$$

En esta ecuación, la condición corporal (CC) se mide en escala de 1 a 9 y toma como referencia un estado corporal de 7. Se utiliza el valor 7 porque las ecuaciones fueron desarrolladas para animales de otros países. En dicha ecuación también se considera que cada punto del estado corporal es aproximadamente el 5 % del peso vivo. En la Tabla 4 se encuentran tabulados algunos pesos ajustados obtenidos a través de la ecuación mencionada anteriormente:

Tabla 4. Peso Vivo Ajustado en función de la condición corporal y el peso vivo real de los animales.

CONDICIÓN CORPORAL		PESO VIVO REAL									
8	368	394	420	446	473	499	525	551	578	604	630
7	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600
6	333	356	380	404	428	451	475	499	523	546	570
5	315	338	360	383	405	428	450	473	495	518	540
4	298	319	340	351	383	404	425	446	468	489	510
3	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480

Se ingresa a la tabla con el valor de condición corporal en la columna de la izquierda, se avanza hacia la derecha en la fila correspondiente hasta encontrar el peso real del animal y luego se desplaza en forma vertical hasta el casillero correspondiente al estado corporal 7. El valor indicado será el PESO VIVO AJUSTADO.

Ej.: Vaca con condición corporal 5, que pesa 540 kg, el PVaj es de 600 kg.

Marchi *et al.*, (1981) propusieron ecuaciones para animales en crecimiento, que permiten estimar el peso que debería tener un animal en función de la edad del mismo (Tabla 5), considerando un estado corporal de 5 (escala 1 a 9).

$$\text{Novillo: Peso} = 550 (1 - 0,9545 e^{-0,0488 x})$$

$$\text{Vaquillona: Peso} = 425 (1 - 1,0208 e^{-0,076 x})$$

Donde: x = edad en meses

Tabla 5. Peso vivo según las ecuaciones propuestas por Marchi *et al.*, (1981).

	EDAD (Meses)						
	6 - 8	9 - 11	12 - 15	16 - 19	20 - 23	24 - 30	> 30
Novillos	158	200	250	300	350	410	500
Vaquillonas	150	190	233	278	328	370	400

Finalmente para el cálculo de la capacidad de ingestión es necesario convertir el peso vivo estimado en unidades de tamaño metabólico. Por lo tanto, la capacidad de ingestión será igual a:

$$\text{Capacidad de Ingestión} = (\text{Peso vivo ajustado})^{0,75}$$

Tabla 6. Tamaño metabólico para los pesos estimados según Marchi *et al.*, (1981).

	EDAD (Meses)						
	6 - 8	9 - 11	12 - 15	16 - 19	20 - 23	24 - 30	> 30
Novillos	44,56	53,18	62,87	72,08	80,91	91,11	105,73
Vaquillonas	42,86	51,17	59,63	68,08	77,07	84,36	89,44

El concepto de *ingestibilidad* se refiere a las características de los alimentos que hacen que los mismos sean ingeridos por los animales en una determinada cantidad. Para forrajes groseros, la ecuación propuesta por el ARC (1980) para el cálculo de la ingestibilidad es:

$$\text{Ingestibilidad (g.MS/kg 0,75 día)} = 2,10 \text{ DMS} - 37$$

De acuerdo con esta ecuación, una mayor digestibilidad representa mayor ingestibilidad debido a que hay menor aporte de material indigestible y por lo tanto, un menor llenado ruminal.

La digestibilidad del forraje no es constante a través del tiempo, sino que varía con el estado fenológico de la pastura. Por lo tanto, es necesario contar con información de digestibilidad de los distintos recursos forrajeros a lo largo del año. Si el dato de digestibilidad no está disponible, una forma de estimarla es a través de la siguiente fórmula:

$$\text{DMS (\%)} = 88,9 - (0,779 \times \% \text{ FDA})$$

(Rohweder *et al.*, 1978)

Con la información de capacidad de ingestión e ingestibilidad, se podrá calcular el consumo y la demanda forrajera total. ☑

5. EJEMPLOS DE PRESUPUESTACIÓN FORRAJERA

A continuación se desarrollará un ejemplo sobre presupuestación forrajera para un establecimiento con sistema de cría bovina puro:

> EJEMPLO 1:

- 1) Campo de 200 has con 4 potreros de pastizal natural (500 has c/u) y pequeña superficie de buffel grass.
- 2) Sistema de cría bovina (Servicio estacionado = Feb., Mar., Abr., Destete = 6 meses, 1er. Servicio = 25-26 meses).
- 3) Se desea conocer: qué superficie de buffel grass se requiere y qué cantidad de vientres y otras categorías se podrá mantener considerando los siguientes supuestos:

> Supuestos:

Utilización de los recursos forrajeros:

- ☐ Vientres: Octubre-Marzo buffel grass, Abril-septiembre pastizal natural.
- ☐ Toros: Febrero-Marzo buffel grass, Abril-Enero pastizal natural.
- ☐ Otras categorías: 12 meses pastizal natural

Disponibilidad de forraje:

- ☐ Área homogénea 1: 100 kg/ha
- ☐ Área homogénea 2: 400 kg/ha
- ☐ Área homogénea 3: 1000 kg/ha
- ☐ Pastura buffel grass: 2000 kg/ha

Factor de uso:

- ☐ Pastizal natural: 50 % de la disponibilidad
- ☐ Buffel grass: 60 % de la disponibilidad
- ☐ Pendiente: 0-10 %

> Cálculo de la Oferta Forrajera Útil (OFU):

PASTIZAL NATURAL	SUPERFICIE (has)	DISTANCIA AGUA (m)	FACTOR DE USO (%)	OFU (kg.MS/ha)	OFU TOTAL (kg)
Área homogénea 1	190	Próximos	50	0	0
Área homogénea 2	100	< 2500	50	200	200.000
Área homogénea 3	500	< 2500	50	500	250.000
Área homogénea 4	300	entre 2501 y 5000	50	250	75.000
				Prom. OFU/ha = 238 kg	

Pastura buffel grass: 10 ha | 1200 kg/ha OFU

Cálculo de la Demanda Forrajera (DF):

- 1) Composición del rodeo:

Cada 100 vientres, 20 vaquillonas (13 a 26 meses), 20 terneras (7 a 12 meses), 5 toros, 1 torito (13 a 26 meses), 1 torito (7 a 12 meses).

- 2) Cálculo de DF por categoría animal:

Para realizar estos cálculos se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- ☐ $DF/día = Consumo \times 1,2$

(Para este ejemplo, se considera un 20 % de desperdicio)

- ☐ $DF \text{ Mensual} = DF/día \times 30$

- ☐ $DFT = \text{Suma de DF mensual}$

- ☐ Peso vivo ajustado (kg): vientres 400 y toros 500; vaquillonas, terneras, toritos II y toritos I, peso ajustado según edad (Marchi *et al.*, 1981)

- ☐ Valores promedios de digestibilidad del pastizal natural y de buffel en distintos meses del año se muestran en la siguiente tabla:

	DICIEMBRE - MARZO	ABRIL - MAYO	JUNIO - OCTUBRE	NOVIEMBRE
Pastizal Natural	65 %	63 %	55 %	63 %
Buffel Grass	65 %	60 %	53 %	60 %

CATEGORÍA VIENTRES

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	DFT	OFU	ha/ani.
PN	Digestibilidad	65	65	65	63	63	55	55	55	55	55	63	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	95,3	95,3	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	95,3	99,5			
	Consumo/Día				8,5	8,5	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,5	8,9			
	DF/Día				10,2	10,2	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	10,2	10,7			
	DF Mensual				306	306	252	252	252	252				1620	292	5,55
BG	Digestibilidad	65	65	65	60	60	53	53	53	53	53	60	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	89	89	74,3	74,3	74,3	74,3	74,3	89	99,5			
	Consumo/Día	8,9	8,9	8,9							6,6	8,0	8,9			
	DF/Día	10,7	10,7	10,7							7,9	9,6	10,7			
	DF Mensual	321	321	321							237	288	321	1809	1200	1,51

CATEGORÍA TOROS

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	DFT	OFU	ha/ani.
PN	Digestibilidad	65	65	65	63	63	55	55	55	55	55	63	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	95,3	95,3	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	95,3	99,5			
	Consumo/Día	10,5			10,3	10,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	10,3	10,5			
	DF/Día	12,6			12,4	12,4	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	12,4	12,6			
	DF Mensual	378			372	372	300	300	300	300	300	372	378	3372	238	14,17
BG	Digestibilidad	65	65	65	60	60	53	53	53	53	53	60	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	89	89	74,3	74,3	74,3	74,3	74,3	89	99,5			
	Consumo/Día		10,5	10,5												
	DF/Día		12,6	12,6												
	DF Mensual		378	378										756	1200	0,63

CATEGORÍA TERNERAS

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	DFT	OFU	ha/ani.
PN	Digestibilidad	65	65	65	63	63	55	55	55	55	55	63	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	95,3	95,3	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	95,3	99,5			
	Consumo/Día						3,4	3,4	4,0	4,0	4,0	5,7	5,9			
	DF/Día						4,1	4,1	4,8	4,8	4,8	6,8	7,1			
	DF Mensual						123	123	144	144	144	204	213	1095	292	3,75

CATEGORÍA VAQUILLONAS

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	DFT	OFU	ha/ani.
PN	Digestibilidad	65	65	65	63	63	55	55	55	55	55	63	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	95,3	95,3	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	95,3	99,5			
	Consumo/Día	5,9	5,9	6,8	6,5	6,5	5,3	6,1	6,1	6,1	6,1	8,0	8,4			
	DF/Día	7,1	7,1	8,2	7,8	7,8	6,4	7,3	7,3	7,3	7,3	9,6	10,1			
	DF Mensual	213	213	246	234	234	192	219	219	219	219	288	303	2799	292	9,59

CATEGORÍA TORITOS I

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	DFT	OFU	ha/ani.
PN	Digestibilidad	65	65	65	63	63	55	55	55	55	55	63	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	95,3	95,3	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	95,3	99,5			
	Consumo/Día						3,5	3,5	4,2	4,2	4,2	6,0	6,3			
	DF/Día						4,2	4,2	5,0	5,0	5,0	7,2	7,6			
	DF Mensual						126	126	150	150	150	216	228	1146	292	3,92

CATEGORÍA TORITOS II

		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	DFT	OFU	ha/ani.
PN	Digestibilidad	65	65	65	63	63	55	55	55	55	55	63	65			
	Ingestibilidad	99,5	99,5	99,5	95,3	95,3	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	95,3	99,5			
	Consumo/Día	6,3	6,3	7,2	6,9	6,9	5,7	6,4	6,4	6,4	6,4	8,7	9,1			
	DF/Día	7,6	7,6	8,6	8,3	8,3	6,8	7,7	7,7	7,7	7,7	10,4	10,9			
	DF Mensual	228	228	258	249	249	204	231	231	231	231	312	327	2979	292	10,20

SUPERFICIE NECESARIA DE CADA RECURSO FORRAJERO

RECURSO FORRAJERO	100 VIENTRES	20 VAQUILLONAS	20 TERNERAS	5 TOROS	1 TORITO I	1 TORITO II	TOTAL HAS.	% SUPERFICIE
Pastizal Natural	555	191,8	75,0	57,8	3,9	10,2	893,8	85,6
Buffel Grass	151			2,9			153,9	14,7
							1047,7	100

□ Por cada UCRI (Unidad de Cría = vientre + % toros + % reposición) se requieren 10,48 has, 8,94 has de pastizal natural y 1,54 has de buffel grass.

> Respuestas:

Para nuestro campo de 2.000 has y planteo productivo, las respuestas son:

- Se necesitan 294 has de buffel grass.
- Se podrán tener 191 vientres, 38 vaquillonas, 38 terneras, 10 toros, 2 toritos II y 2 toritos I.

> EJEMPLO 2:

1) Campo de 2.000 has con 4 potreros de pastizal natural (500 has c/u).

2) Sistema de cría bovina-caprina.

3) Se desea conocer: cuántas vacas y/o cabras pueden tenerse sin deteriorar el recurso considerando los siguientes supuestos:

> Supuestos:

Utilización de los recursos forrajeros:

- Único recurso forrajero pastizal natural.
- Disponibilidad de forraje (ver tabla al pie de pág.).

Factor de uso:

- Gramíneas: 50 % de la disponibilidad.
- Leñosas: 50 % de la disponibilidad de brotes del año y hojarasca.

	PASTOS (kg/ha)	LEÑOSAS (kg/ha)
Área homogénea 1	50	400
Área homogénea 2	400	400
Área homogénea 3	1000	400

> Cálculo de la Oferta Forrajera Útil (OFU):

PASTIZAL NATURAL	SUPERFICIE (has)	DISTANCIA AGUA (m)	OFUP/ha (kg)	OFUP TOTAL (kg.MS/ha)	OFUL/ha (kg)	OFUL TOTAL (kg.MS/ha)
Área homogénea 1	200	Próximos	25	5000	200	40.000
Área homogénea 2	100	< 2500	200	200.000	200	200.000
Área homogénea 3	500	< 2500	500	250.000	200	100.000
Área homogénea 4	300	entre 2501 y 5000	250	75.000	100	30.000
			Prom. OFUP/ha = 295 kg		Prom. OFUL/ha = 185 kg	

> Cálculo de la Demanda Forrajera (DF):

En este caso debemos calcular la DF de las 2 especies animales.

□ En el caso de las vacas, la DF Equivalente Vaca/día (DF EV) calculada en el Ejemplo 1 fue de 9,5 kg.MS promedio anual.

□ En el caso de las cabras, en este ejemplo se considerará un consumo equivalente al 3,5 % del peso vivo y un desperdicio del 10%.

Por lo tanto, si tenemos un animal de 45 kg de peso adulto, la DF será:

Consumo cabra/día = 3,5 % del peso vivo -- 1,6 kg.MS/día

Desperdicio cabra = 10%

DF Equivalente cabra/día (DF EC) = $1,6 \times 1,1 = 1,8$ kg

> Capacidad de carga considerando una sola especie animal:

Capacidad de carga bovina (CCB) = $DF\ EV \times 365 / OFUP$

> para este caso CCB = $3450\ kg / 295\ kg = 11,7$ ha/EV

> para 2000 has = 171 EV

Capacidad de carga caprina (CCC) = $DF\ EC \times 365 / OFUL$

> para este caso CCC = $657\ kg / 185\ kg = 3,5$ ha/EC

> para 2000 has = 571 EC

> Capacidad de carga considerando las dos especies animales:

En este caso hay que tener en cuenta el grado de superposición dietaria (SD) entre las especies animales, es decir, la proporción de especies vegetales que son consumidas por ambas especies animales. La SD se puede determinar a partir de la fórmula propuesta por Bray y Curtis (1957):

$$SD = (2) \times W / (A + B)$$

Donde:

W = sumatoria de la cantidad de cada especie común a ambas dietas.

A = cantidad total de todas las especies en la dieta de caprinos.

B = cantidad total de todas las especies en la dieta de bovinos.

Un ejemplo sobre la determinación de los distintos parámetros de SD se muestra en la Tabla 7.

Con esta información disponible, el próximo paso es determinar la tasa de sustitución (TS) interespecífica. Una forma de realizar esta determinación es a través de la fórmula propuesta por Johnson (1979):

$$TS = (DF\ EV / DF\ EC) \times (1/SD)$$

Donde TS es el número de unidades del herbívoro más pequeño que consume el forraje equivalente al herbívoro de mayor tamaño.

Para el ejemplo:

$$SD = (2) \times W / (A + B) = (2 \times 25,6) / (92,6 + 93,3) = 0,275$$

$$TS = (DF\ EV / DF\ EC) \times (1/SD) = (9,5/1,8) \times (1/0,275) = 19,2\ EC$$

> ¿Cuántas vacas y cabras se podrían tener sin afectar los recursos forrajeros?

$$\text{Si: } 19,2\ EC \quad 1\ EV$$

$$571\ EC \quad x = 571/19,2 = 30\ EV$$

Entonces se podría tener: 141 EV + 571 EC

Si la SD = 0,65

Luego:

$$TS = (9,5/1,8) \times (1/0,65) = 8,1\ EC$$

Podría tener: 101 EV + 571 EC

Si la SD = 1

Luego:

$$TS = (9,5/1,8) = 5,3\ EC$$

Podría tener: 63 EV y 571 EC

Tabla 7. Determinación de los distintos parámetros de SD.

ESPECIE	DIETA CAPRINO (%)	DIETA BOVINO (%)	W (%)
<i>Celtis sp.</i>	16,8	0	0
<i>Digitaria californica</i>	1,6	15,6	1,6
<i>Lantana sp.</i>	0,9	9,8	0,9
<i>Wisadula densiflora</i>	8,5	1,7	1,7
<i>Setaria leiantha</i>	3,8	17,3	3,8
<i>Justicia squarrosa</i>	1,6	1,2	1,2
<i>Ximenea americana</i>	1,2	0	0
<i>Digitaria insularis</i>	3,1	22,9	3,1
<i>Schinopsis que. Colorado</i>	8,8	8,5	8,5
<i>Acacia furcatispina</i>	3,5	0	0
<i>Lipia turbinata</i>	1,8	0	0
<i>Clematis montevidensis</i>	7,2	0	0
<i>Ziziphus mistol</i>	5,2	3	3
<i>Castela coccinea</i>	20,5	1	1
<i>Maytenus spinosa</i>	2,4	0	0
<i>Atamisquea americana</i>	0,8	1,6	0,8
<i>Tillandsia sp.</i>	3,6	0	0
<i>Trichloris crinita</i>	0	2,3	0
<i>Gouinia paraguariensis</i>	0	4,5	0
<i>Neobouteloua lophostachia</i>	0	0,4	0
<i>Setaria sp.</i>	0	2,6	0
TOTALES	92,6	93,3	25,6

6. BIBLIOGRAFÍA

- **ARC. Agricultural Research Council. 1980.** The Nutrient Requirements of Ruminant livestock. Technical Review by an Agricultural Research Council Working Party Commonwealth Agr.
- **Bray R.J., Curtis J.T. (1957).** An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. Ecol Monogr 27: 325-349.
- **Golluscio, R. 2009.** Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. Ecología Austral 19: 215-232.
- **Holechek, J. 1988.** An Approach for Setting the Stocking Rate. J. Rangelands 10(1): 10-14.
- **Holechek, J. L., R. D. Pieper and C. H. Herbel. 1989.** Range Management. Principles and Practices. Prentice-Hall Book, Co. Englewood. Cliffs, N. J. 501 p.
- **Johnson, M. K. 1979.** Foods of primary consumers in southcentral Idaho. J. Range Manage 32: 365-368.
- **Marchi, A.; Giraud, C. y Haider, V. 1981.** Consumo y su relación con la edad y el peso en bovinos: 1. Con forraje verde de baja calidad. Revista Argentina de Producción Animal. Vol. 7: 21-28.
- **Smart, A. J., Derner, J. D., Hendrickson J. R, Gillen, R. L., Dunn, B. H., Mousel, E. M., Johnson, P. S., Gates, R. N., Sedivec, K. K., Harmoney, K. R., Volesky, J. D., and Olson, K. C. 2010.** Effects of Grazing Pressure on Efficiency of Grazing on North American Great Plains Rangelands. Rangeland Ecol Manage 63: 397-406.
- **Rohweder, D. A.; Barnes, R. F.; Jorgensen, N. 1978.** Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. J. Anim. Sci. 47(3): 747-759. ☑

El presente manual describe las bases conceptuales y los procedimientos requeridos para evaluar, planificar y monitorear pastizales naturales con fines ganaderos en la región ecológica del Chaco Árido. Se trata de una serie de protocolos, que aunque están bajo continua actualización, podrían ser aplicados por colegas en la región. Los procedimientos propuestos resumen más de 3 décadas en el uso de metodologías por el INTA EEA La Rioja, los cuales fueron perfeccionándose en función de las experiencias a campo y de la aparición de nuevas tecnologías de monitoreo y procesamiento de información.

ISBN 978-987-8333-27-4



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina