

# Método de estimación del fitovolumen leñoso en la zona semiárida de Chile mediante una imagen SPOT y mediciones de campo

L. Morales<sup>1,2</sup>, J. Sobrino<sup>3</sup>, G. Castellaro<sup>2</sup>, J. El-Kharraz<sup>3</sup>, y J.C. Parra<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidad Tecnológica Metropolitana. Santiago, Chile.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

<sup>3</sup> Unidad de Cambio Global. Universidad de Valencia. Valencia, España.

<sup>4</sup> Departamento de Física, Universidad de La Frontera. Temuco, Chile.

## RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología de estimación del fitovolumen en regiones semiáridas de montaña en Chile, a partir de mediciones de terreno relativamente sencillas. Estas se realizan en dos transectos ortogonales de 25 m cada uno, a lo largo de los cuales se miden las alturas y el ancho de cada mata de vegetación leñosa y los intervalos entre ellos. En estas zonas de Chile, la vegetación arbustiva se distribuye en unidades de contorno ovalado, dejando espacios libres alrededor de cada unidad. Dicha distribución hace posible construir un modelo estadístico de distribución, aplicando el algoritmo de Montecarlo para estimar el fitovolumen y el número total de matas en un cuadrado de 25x25 m<sup>2</sup>. Este modelo necesita solamente de la longitud de los transectos, el número de matas en cada transecto, el ancho de cada mata y la altura de cada mata. Además se requiere de un factor que esta relacionado con la variabilidad y tipo de las especies, y que toma valores comprendidos entre 1 y 2,2, que corresponden respectivamente a una vegetación de árboles y a una vegetación de estepa rala. Para obtener la distribución espacial del fitovolumen, se usaron dos sectores de una imagen captada por el satélite SOPT 4 el 6 de enero de 1998, y correspondientes a las zonas de Chillepín y Los Rulos. De esta forma se obtuvieron relaciones entre el fitovolumen y el NDVI, con un coeficiente de correlación de 0,77, y un error cuadrático medio del 12%.

PALABRAS CLAVE: Fitovolumen, Chile, SPOT.

## ABSTRACT

We propose a methodology to estimate phytovolume in an arid-mountain ecosystem of Chile, derived from relatively simple field measurements and SPOT data. These measurements were made in two orthogonal transects of 25 m each one, where the height and the width of ligneous bushes and the distance between them was measured. In these zones, the ligneous vegetation is distributed in units of oval contour, leaving free spaces between each unit. This distribution permits to obtain a statistical model of spatial distribution, applying the Montecarlo algorithm to estimate phytovolume and total number of plants in a quadrant of 25x25 m<sup>2</sup>. The model needs only the length of the transect, the number of plants in every long section, the width and the height of every plant. It also needs a factor that it is related to the types and species variability. The range of this factor is between 1 and 2.2, which correspond to ligneous vegetation and grassland vegetation respectively. In order to find the spatial distribution of the phytovolume, two scenes SOPT4 were used, of January 6 of 1998, corresponding to the areas of Chillepín and Los Rulos. The relationships between the fitovolumen and the NDVI present a correlation coefficient of 0,77, and a root mean square error of 12%.

KEY WORDS: Phytovolume, Chile, SPOT.

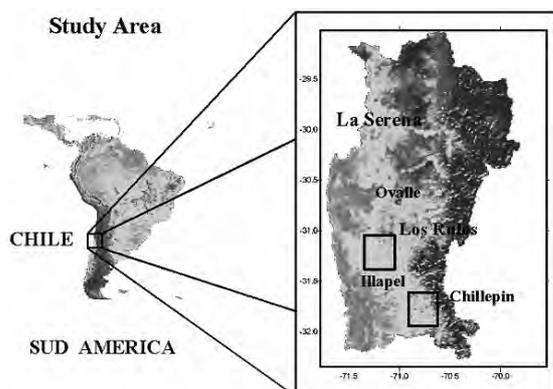
## INTRODUCCIÓN

La importancia de la vegetación leñosa esta asociada con su capacidad de mantener la estructura física del paisaje, y su contribución al funcionamiento de los ecosistemas. Los ecosistemas áridos y semiáridos de Chile, muestran con frecuencia una estructura en parches, con una biomasa relativamente alta, pero dispersos en una matriz de suelo pobre en vegetación (Aguilar y Sala, 1999). A modo

de ejemplo, los parches leñosos en una matriz herbácea en Chile árido y semiárido evidenció que no hay cambios en un período de 30 años. El Parque Nacional Fray Jorge, en la Región de Coquimbo (Figura 1), muestra que la vegetación arbustiva no ha cambiado en los últimos 50 años, a pesar de la variabilidad de las precipitaciones en similar período. Este hecho indica que en la zona árida y semiárida de Chile los parches leñosos son altamente estables. Por ello la vegetación arbustiva en este

tipo de ambientes contribuye a frenar los efectos erosivos y procesos de desertificación en esta zona. Por un lado el follaje de la vegetación y la hojarasca depositada en el suelo tiende a frenar la energía con que las precipitaciones impactan el suelo, y por otro el tronco y las raíces disminuyen la capacidad de remoción de partículas del suelo, y aminoran la velocidad del agua que escurre superficialmente. Por último, el efecto de la vegetación leñosa reduce el potencial erosivo del viento (Fuentes *et al.*, 1984). Por estas razones la vegetación leñosa cumple un papel muy importante en el ecosistema, que puede ser estudiado a partir de algunos indicadores de fácil medición como el fitovolumen (Armand *et al.*, 1992; Bakkali *et al.*, 2001).

El fitovolumen es el volumen ocupado por la vegetación leñosa sobre el suelo y es un indicador ambiental fácilmente medible en el terreno por métodos no destructivos (Etienne, 1989). Este dato del estado ecológico del medio y de la productividad del suelo, especialmente, el poder de captación de agua de lluvia por la vegetación y la facilidad con la que este agua podrá infiltrarse en el suelo. No es sólo la superficie cubierta por la vegetación, sino todo el volumen vegetal el que capta las precipitaciones. El fitovolumen da cuenta, igualmente, de la cobertura vegetal y de la biomasa producida por el suelo, ya que a excepción de las cactáceas, esta biomasa es proporcional al volumen ocupado por el follaje (Robles, 2001). El fitovolumen puede ser estimado reemplazando la unidad vegetacional por una estructura geométrica conocida, como un paralelepípedo, prisma de base elíptica o un cono (Armand *et al.*, 1992).



**Figura 1.** Zonas de estudio correspondientes a Chilipepin y Los Rulos, ubicadas respectivamente en la precordillera andina y en la zona intermedia de la Región de Coquimbo, Chile.

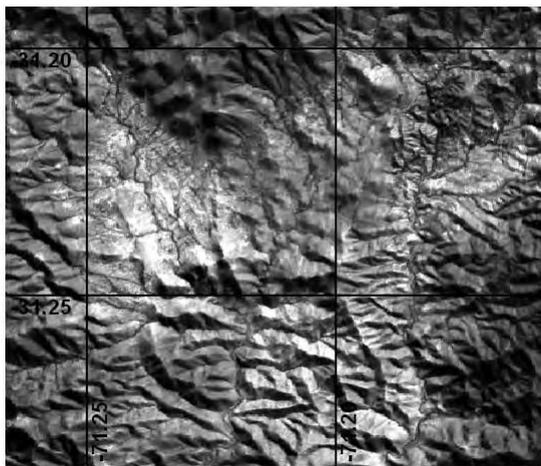
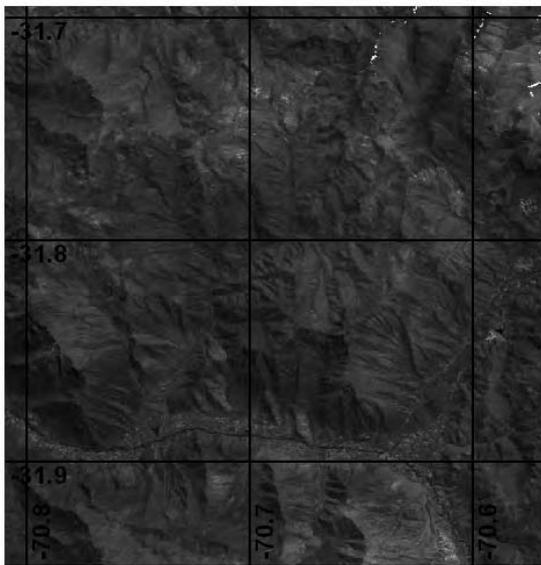
El fitovolumen ha sido utilizado como indicador de la desertificación en varios estudios en la Región de Coquimbo (Figura 1), Chile (Pouget *et al.*, 1996). El fitovolumen normalmente se calcula a partir de tasas de recubrimiento de cada estrato vegetal leñoso multiplicado por su altura media (Etienne, 1989). En esas condiciones es difícil obtener una estimación precisa de éste, pues las alturas medias, así como las tasas de recubrimiento de los estratos leñosos, deben ser estimadas sobre el terreno. En este trabajo se propone un método simple de estimación de la distribución espacial del fitovolumen, utilizando datos de terreno e información procedente de una imagen captada por el satélite SPOT 4.

## METODOLOGÍA

El área de estudio del presente trabajo corresponde a la IV Región o Región de Coquimbo de Chile, ubicada aproximadamente entre los -29 y los -32 grados de latitud (Figura 1). Según la clasificación de Köepen corresponde a una estepa árida, donde se distinguen tres sectores: la costa, con un clima de estepa de nubosidad abundante; en el interior, con un clima de estepa templado marginal en el norte, y un clima de estepa templada con precipitaciones invernales en el sur. La precordillera y cordillera presentan un clima de estepa frío de montaña (Romero, 1985). El estudio se ha realizado en los distritos de Chilipepin, Coirón, Alto Choapa, y Los Rulos. Esta región semiárida de la precordillera andina comprende alrededor de 1.500 ha irrigadas por canales en el valle del río Choapa y 20.000 ha de terrenos de montaña que culminan a 3.000 m de altitud. La precipitación promedio anual es de 250 mm., sin embargo, el aporte de agua a la cuenca es realizado por el río Choapa y en forma continua, pues su cauce no se seca durante el año.

La distribución de los vegetales leñosos en su medio natural semiárido de la precordillera andina no es enteramente aleatoria, pues existe alrededor de cada uno de ellos un espacio desnudo, que es mayor según el número de unidades vegetales es más reducido (Alvarez *et al.*, 2002). Por otra parte el fitovolumen se estima suponiendo que cada unidad vegetal queda representada por un paralelepípedo regular, que la envuelve, definición que está de acuerdo con otros autores (Armand *et al.*, 1992). Como el método propuesto pretende ser simple y rápido en el terreno, el objetivo fundamental es estimar el fitovolumen leñoso a partir de dos cortes transversales y ortogonales de 25 m cada uno, a lo

largo de los cuales se mide el alto y ancho de cada planta leñosa encontrada (Figura 3). Esta forma ahorra una enorme cantidad de tiempo, si se compara con medir cada unidad de vegetación o individuo en el interior de cada pixel a muestrear. Para ello se trabajó con una imagen multispectral HRVIR captada por el satélite SPOT 4 el 6 de enero de 1998, de la que se han utilizado dos sectores rectangulares correspondientes a las zonas de Chillipín (31,95° - 31,7° de latitud sur, 70,81° - 71,6° longitud oeste) y Los Rulos (31,29 - 31,19° de latitud sur, 71,27° - 71,16° de longitud oeste).



\*Figura 2. Imágenes falso color captadas por el sensor HRVIR del satélite SPOT 4 el 6 de enero de 1998. En ellas se observan las zonas de Chillipín (a) y Los Rulos (b) en la Región de Coquimbo, Chile.

\* Todas la figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

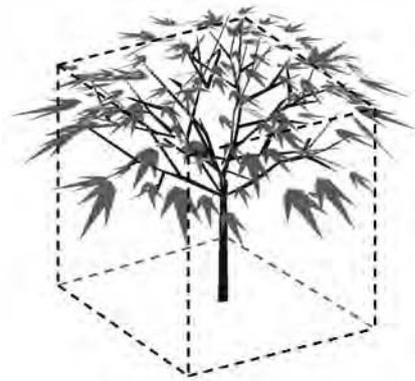
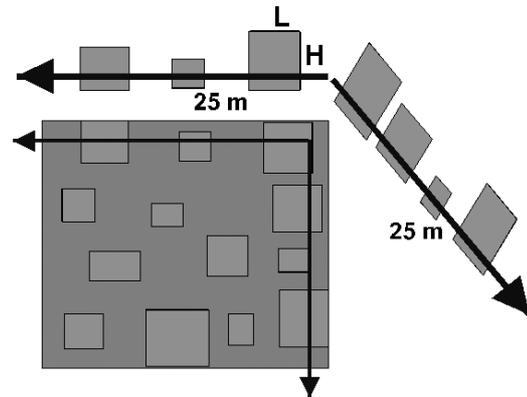


Figura 3. (a) Distribución espacial de la vegetación leñosa en el interior de un área hipotética de 25 x 25 m. El fitovolumen se estima a partir de dos transectos ortogonales. (b) El fitovolumen de cada unidad leñosa se ha calculado ajustando un paralelepípedo a las dimensiones del vegetal.

Las zonas de estudio representan el 1,9 % de la superficie de la Región de Coquimbo, donde Chillipín posee 760 km<sup>2</sup>, y Los Rulos 125 km<sup>2</sup>. Estos sectores de la imagen fueron corregidas geométricamente utilizando un archivo vectorial de la red hídrica de la zona obtenido por digitalización de los mapas a escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM). Las dos imágenes se han corregido usando puntos de control extraídos de un archivo vectorial de la red hídrica y ecuaciones polinomiales de primer orden, pues el área de cada sector es pequeña. El método de remuestreo fue de convolución cúbica, con una resolución espacial de 25 m. Para este proceso se usaron 120 puntos de control en el área de Chillipín y 50 en el área de Los Rulos, arrojando el proceso un error cuadrático medio de 8,2 m. Una vez terminado este proceso, se realizaron a las escenas correcciones atmosféricas por el método de

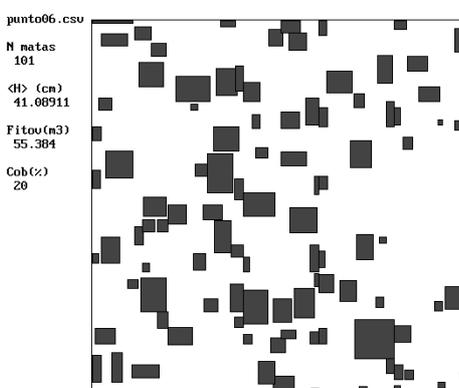
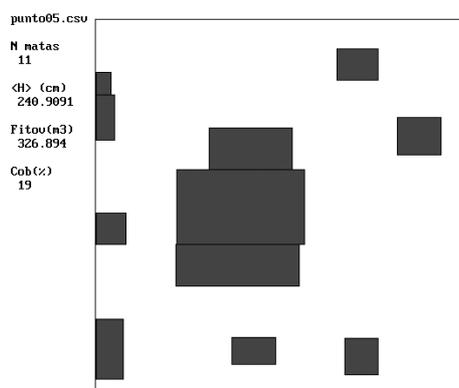
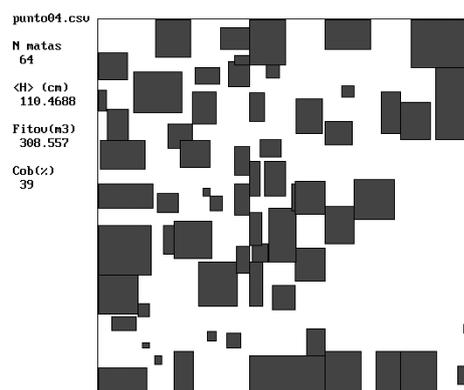
Chávez (1996). Este método a pesar de su sencillez es válido para realizar las correcciones, sin embargo para reflectividades altas presenta errores mayores al 15 %. Este último hecho no es importante para las áreas consideradas, pues en la mayor parte de ellas las reflectividades son bajas.

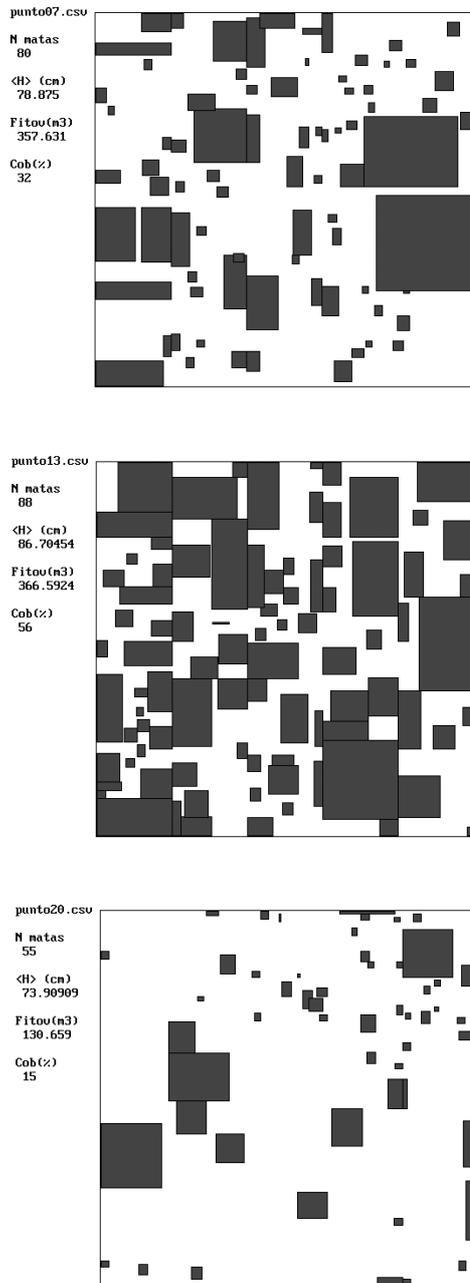
Para poder estimar el fitovolumen se muestrearon 28 parcelas de campo en el área en estudio y se midió en el interior de cada una las dimensiones de cada unidad vegetal. Adicionalmente se midieron los transectos ortogonales para cada una de las parcelas de campo. Para ello se escogieron áreas potenciales a partir de escenas captadas por el sensor HRVIR del satélite SPOT 4. Los sitios de campo fueron seleccionados por homogeneidad y tipo de vegetación, esto es zonas ecológicamente diferentes, pero su distribución final fue estratificada. Este hecho se debe a que la vegetación leñosa se concentra mayoritariamente en los valles, respuesta que deriva de la adaptación de la vegetación a la zona árida (Gastó *et al.*, 1985; Gajardo, 1994). Posteriormente en cada una de ellas se midieron las dimensiones de cada unidad leñosa a lo largo de dos transectos ortogonales de 25 m. Además se anotó la especie botánica de cada planta, así como las coordenadas del lugar, su orientación, pendiente y altura, de manera que se pudiera situar el sitio con precisión en una cartografía oficial. La tabla 1 muestra los datos reales más relevantes de las parcelas de campo. La figura 4 muestra el aspecto de seis de la fichas de campo donde se muestra la distribución espacial de la vegetación en el interior de ellas.

Longitud (°)	Latitud (°)	Número de plantas	Altura media de la vegetación (m)	Cobertura vegetal (%)	Fitovolumen (m³/píxel)
-70,689332	-31,880135	80	0,79	32	357,63
-70,689763	-31,878262	71	1,28	49	517,96
-70,689169	-31,876412	32	1,96	29	524,87
-70,689353	-31,875498	64	1,11	39	308,56
-70,688959	-31,878210	60	1,39	45	491,38
-70,688855	-31,874819	67	1,09	53	371,02
-70,687528	-31,873971	88	0,87	56	366,59
-70,688268	-31,871661	29	1,81	56	1003,61
-70,685425	-31,871672	34	2,74	49	1118,09
-70,685455	-31,872727	46	1,64	45	639,89
-70,683322	-31,869336	47	1,73	63	679,79
-70,682744	-31,868956	93	1,34	34	434,78
-70,687034	-31,881077	16	1,84	28	475,73
-70,687220	-31,879090	55	0,74	15	130,66

**Tabla 1.** Datos más relevantes de las parcelas de campo utilizadas en el estudio.

En este proceso se generó un conjunto de datos que permitió calibrar un modelo computacional de simulación que estima, a partir de los transectos, el fitovolumen en el interior del área encerrada por los transectos. Este modelo, denominado “Phytov” (Alvarez *et al.*, 2002), se basa en una simulación de la distribución de las plantas leñosas, reduciéndolas a simples paralelepípedos.





**Figura 4.** Seis de las fichas de campo donde se muestra la distribución espacial de la vegetación en el interior de las áreas de 25x25 m.

Para estimar el número de unidades en un espacio dado, se supone que las plantas se distribuyen homogéneamente, como se observa en el medio natural. De tal forma que las dimensiones de las plantas, es decir, alto y ancho, se distribuyen normalmente (Alvarez, 2002). El método empleado

para la estimación de la composición más probable del pixel es el de Monte-Carlo (Ross, 1990). El modelo parte de los valores medios del ancho y alto, y sus respectivas desviaciones típicas a partir de los transectos. El número de individuos en el interior de un área de muestro es calculado a partir del número de individuos en cada transecto, esto se fundamenta en las relaciones alométricas existentes entre especies de leñosos (Robles, 2001). Si consideramos a  $N_x$  y  $N_y$ , como el número de individuos en  $x$  e  $y$  respectivamente, el número total de individuos en el interior del área de muestreo es proporcional al producto de los individuos en cada transecto, esto es:

$$N = \text{Factor } N_x N_y \quad (1)$$

donde Factor es un coeficiente que depende de la altura media de las unidades vegetales en el interior del área de muestreo. Posteriormente el modelo genera poblaciones en el interior de cada píxel con distribución normal, de tal forma que el cálculo se repite tantas veces como sea necesario hasta obtener el valor más probable, de esta forma se obtiene un valor de fitovolumen para ese lugar.

Con el fin de extrapolar las medidas puntuales de fitovolumen a toda la zona en estudio, se utilizó el índice de vegetación normalizado NDVI (Rouse *et al.*, 1974; Tucker, 1979) que permite apreciar la intensidad de la actividad clorofílica y que tiene la ventaja de ser un índice sencillo. La vegetación leñosa, en las áreas de estudio, se encuentra en lugares donde el NDVI es alto en relación con su entorno. En el caso de una imagen SPOT HRVIR el NDVI se calcula de acuerdo a:

$$NDVI = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (2)$$

donde  $r_3$  y  $r_2$  son las reflectividades calculadas a partir de los canales XS3 y XS2 de HRVIR (Chuvienco, 2002). Si consideramos que un píxel está compuesto por un porcentaje de vegetación y otro de suelo, el NDVI de ese píxel se puede calcular como compuesto por una media ponderada de las proporciones de vegetación y suelo. Si llamamos  $P_v$  y  $P_s$  a las coberturas de vegetación y suelo respectivamente, y al  $NDVI_v$  y  $NDVI_s$  como los índices de vegetación medios correspondientes a la vegetación y el suelo, el NDVI del píxel puede considerarse como:

$$NDVI = P_x NDVI_x + P_y NDVI_y \quad (3)$$

donde la suma de las coberturas de vegetación y suelo es igual a la unidad. Considerando que:

$$P_x = 1 - P_y \quad (4)$$

Entonces:

$$NDVI = NDVI_x + P_y (NDVI_y - NDVI_x) \quad (5)$$

Si hacemos un razonamiento análogo al anterior, el fitovolumen del píxel puede ser estimado mediante:

$$Phytov = P_y \Delta x \Delta y \langle h \rangle \quad (6)$$

donde Dx y Dy son las dimensiones del píxel, y  $\langle h \rangle$  la altura media de la vegetación. A partir de las ecuaciones 5 y 6, se puede eliminar la fracción de vegetación, de tal forma que el fitovolumen puede ser estimado por:

$$Phytov = a NDVI - b \quad (7)$$

donde a y b vienen dados por:

$$a = \left( \frac{\Delta x \Delta y \langle h \rangle}{NDVI_y - NDVI_x} \right)$$

$$b = \left( \frac{NDVI_x \Delta x \Delta y \langle h \rangle}{NDVI_y - NDVI_x} \right)$$

A partir de estas expresiones es posible estimar la distribución espacial del fitovolumen en el área de estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La aproximación (3) resultó ser adecuada, ya que proporciona un error del orden del 10% para la zona de estudio, compuesta por suelos de tipo aridisol y cobertura vegetal media inferior al 40%. Este resultado se obtuvo utilizando los espectros de suelo desnudo y vegetación de la base de datos de Salisbury y D’Aria (1992). Una vez presentado el modelo, las relaciones obtenidas se confrontaron con medidas de terreno efectuadas sobre tipos de vegetación muy diferentes. Se observó que era

necesario introducir un factor dependiente del tipo de vegetación y que permitiera ajustar los valores del modelo con los valores reales medidos. El factor varía entre 1, en el caso de vegetación arbórea densa, y 2,0 en el caso de vegetación rasa. La correlación entre el “factor” y la “altura media” de la vegetación ha sido calculada a partir de las mediciones hechas en los 28 puntos muestreados., y viene dada por:

$$Fact = \frac{1}{0.2113 h + 0.3453} \quad (8)$$

donde h corresponde a la altura media de la vegetación en los transectos. Esta ecuación posee un coeficiente de determinación de 0,85 y un error cuadrático medio del 1,83% (Figura 5). A partir de esta relación el modelo evalúa directamente la cobertura vegetal, el número de unidades leñosas por hectárea y el fitovolumen.

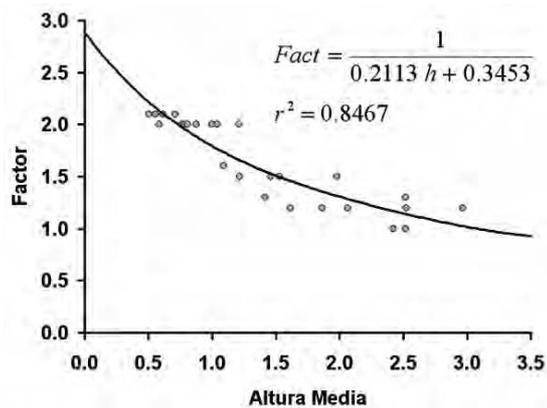
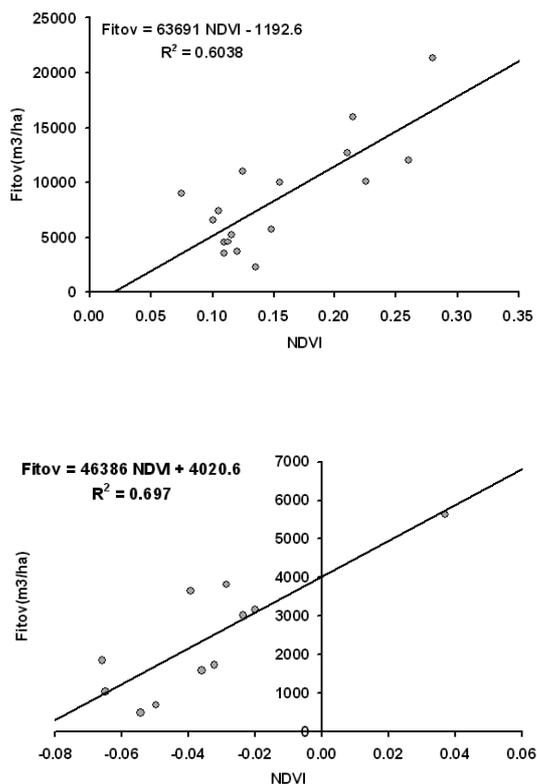


Figura 5. Relación entre la altura media en metros de los vegetales leñosos en el interior de un píxel y el factor de distribución espacial de especies.

Para extrapolar las medidas puntuales de fitovolumen al conjunto de las zonas de estudio se tomaron los puntos en que fue medido el fitovolumen y se calcularon los valores promedio de NDVI para esos puntos. Una vez eliminado el efecto de sombras en la imagen, se constató que existen relaciones lineales diferentes entre el fitovolumen y el NDVI en cada uno de sitios utilizados, esto es Chillepín y Los Rulos, debido a que corresponden a dos condiciones ecológicas diferentes (Figura 6). Los coeficientes de correlación en Chillepín y los Rulos, son 0,78 y 0,7 respectivamente, indicando que la relación entre las variables es moderada-

mente fuerte. En ambos casos las relaciones entre la variable fitovolumen y NDVI es estadísticamente significativa, pues el valor  $p$  es menor que 0,01 con un nivel de confianza del 99%. Se observó que si se agrupan los datos de los dos sitios, esto es Chillepín y Los Rulos, se aprecia una tendencia no lineal entre el fitovolumen y el NDVI. Esto se debe a que el modelo lineal propuesto es aplicable a sitios ecológicos que tengan una condición similar, esto es en cuanto a estado de conservación y formación vegetal. Este último hecho se debe a que las formaciones son diferentes, pero también es posible interpretar que la condición o estado de la vegetación sea diferente. En el caso de este trabajo, la diferencia radica en que se trata de dos zonas ecológicas compuestas por formaciones vegetales diferentes. Chillepín corresponde a una estepa fría y Los Rulos a una estepa templada invernal (Gastó *et al.*, 1985; Gajardo, 1994).



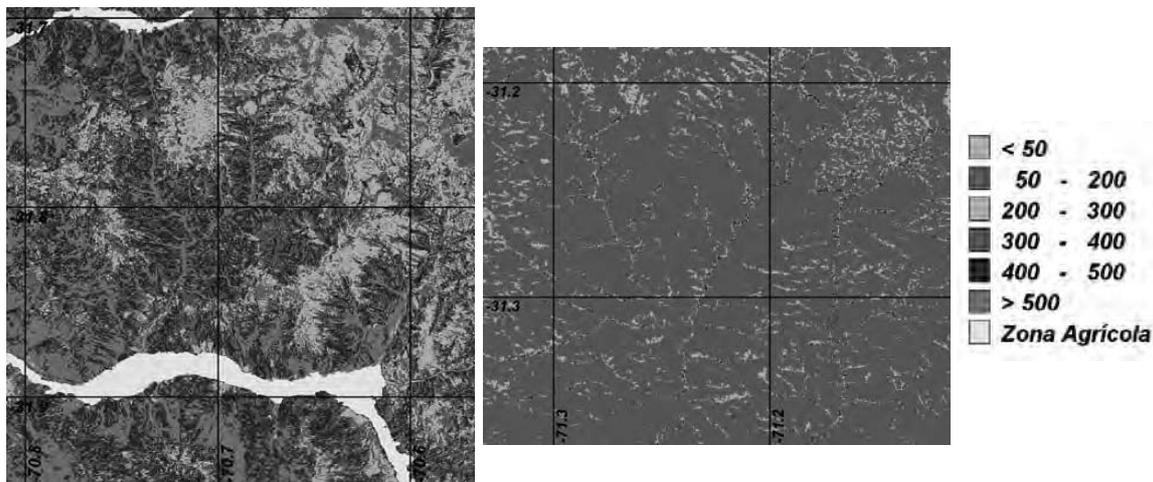
**Figura 6.** Relación entre el NDVI y el fitovolumen (m³/pixel) en el interior de las zonas de Chillepín (a) y Los Rulos (b).

Es posible deducir por tanto, que si se estudian zonas homogéneas en cuanto a formación y estado de la vegetación, la relación entre el fitovolumen y el NDVI debe ser lineal. Es importante mencionar que este método funciona razonablemente bien en condiciones áridas y semiáridas, debido fundamentalmente a que el acceso al recurso agua es limitante para el crecimiento de la vegetación. El factor antrópico contribuye notablemente, sobre todo en la corta de especies arbóreas para consumo familiar, esto es calefacción y preparación de alimentos. En la zona esto se aprecia claramente, ya que la Región de Coquimbo presenta índices de pobreza altos, lo que repercute en la extracción de especies arbóreas.

Aplicando la respectiva ecuación de regresión a la imagen del Índice de Vegetación para las zonas de Chillepín y Los Rulos, IV Región de Chile, se obtienen imágenes de los valores continuos de Fitovolumen. Estos se visualizaron usando umbrales, que permiten obtener valores discretos de fitovolumen en m³/pixel (Figura 7). La tabla 2 muestra los valores de los parámetros estadísticos correspondientes a cada clase usada para la confección de la figura 7.

Los resultados obtenidos muestran similitud con los obtenidos en trabajos anteriores (Alvarez *et al.*, 2002) en la zona patrón, Chillepín, usada también en este trabajo. En efecto, la zona de Chillepín es usada como referencia, pues es la que presenta mayor fitovolumen, como se observa en la figura 7, y Los Rulos es una estepa muy degradada por efecto antrópico.

En el terreno se observó que las zonas con vegetación arbórea densa y las zonas con vegetación arbórea clara se componen de las mismas especies, principalmente *Quillaja saponaria*, *Prosopis chilensis* y *Acacia caven*. La primera es una formación compacta y la segunda es una formación fragmentada en la que los grupos de árboles están separados por zonas de suelo desnudo. Se aprecia la existencia de una tasa de corte para leña significativa, de hecho pensamos que la fragmentación observada se debe fundamentalmente a esta práctica. Este proceso afecta gravemente a la formación de suelos, ya que la capa de humus queda expuesta al sol transformándose en una textura muy fina que no persiste, debido a la ganadería caprina y el efecto de lavado de las precipitaciones. Con ella desaparece la reserva de semillas y la facultad de reproducción de la vegetación leñosa. De esta forma se produce la fragmentación de la vegetación arbórea.



\*Figura 7. Fitovolumen en m<sup>3</sup>/píxel estimado a partir del NDVI de la imagen captada por el satélite SPOT 4 en las áreas de Chilipén (a) y Los Rulos (b) en la Región de Coquimbo, Chile.

Clase	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
1: < 50	5,64	49,77	38,29	8,47
2: 20 - 200	50,00	199,99	149,74	23,77
3: 200 - 300	200,06	299,90	241,51	27,735
4: 300 - 400	300,02	399,21	343,49	28,40
5: 400 - 500	400,39	499,22	765,36	28,72
6: > 500	500,55	1235,46	989,29	38,49
7: Zona agrícola excluida del presente estudio				

Tabla 2. Parámetros estadísticos (de la especialización) del fitovolumen para cada clase de la figura 7. Valores en m<sup>3</sup>/píxel.

## CONCLUSIONES

El fitovolumen leñoso es un dato fácilmente calculable en el terreno mediante un modelo de estimación. Las medidas puntuales se pueden luego extrapolar geográficamente, utilizando el índice de vegetación de imágenes captadas por satélite. Sin embargo, esta extrapolación sólo es válida bajo ciertas condiciones. En efecto, es necesario elegir una imagen cuya fecha corresponda a la estación en que la vegetación herbácea está en el mínimo y que no interfiera con la vegetación leñosa. Igualmente es necesario elegir sitios suficientemente homogéneos y representativos, al objeto de evitar varios tipos de formación vegetal en la misma zona. La validez de la extrapolación depende del número de puntos de medida efectuados en la zona de estudio.

Las medidas permitieron muestrear los principales tipos de formaciones vegetales de la zona.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue financiado por la Dirección de Investigación y Desarrollo Académico de la Universidad Tecnológica Metropolitana (Chile), al Proyecto DIDUFRO N° 120320, financiado por la Universidad de La Frontera (Chile), y el proyecto de cooperación bilateral A/0229/03 de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI).

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUIAR M. y SALA O., 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 14:273-277.
- ALVAREZ, D., MORALES, L. y DUBROEUCQ, D., 2002. Application d'un modèle d'estimation du phytovolume à la cartographie du déboisement en région semi-aride au Chili. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 13(1): 21-26.
- ARMAND, D., ETIENNE, M., LEGRAND, C. y MARÉCHAL, J. C., 1992. Phytovolume, phytomasse et relations structurales d'espèces arbus-

\* Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

- tives forestières méditerranéennes. *Ann. Sci. For.*, 50: 79-89.
- BAKKALI A., OUIJJA A., DIOURI M., ZINE EL ABIDINE A., QARRO M., EZZAHIRI M. y BEL-GHAZI B., 2001. Phytomasse aérienne du cytise de Battandier (*Argyrocytisus battandieri* Maire) dans le Moyen Atlas tabulaire marocain: exemple des forêts d'Azrou et de Sidi M'Guild. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 12(4): 239-244.
- CHAVEZ, P. S., 1996. Image-based atmospheric corrections. Revised and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1025-1036.
- CHUVIECO, E., 2002. Teledetección ambiental. Editorial Ariel, S. A., Barcelona, España, 586 p.
- ETIENNE, M., 1989. Non destructive methods for evaluating shrub biomass: a review. *Acta OEcologica/OEcol. Applic.*, 10(2): 115-128.
- FUENTES E., OTAIZA R., ALLIENDE A., HOFFMANN A. y POIANI A., 1984. Shrub clumps in the Chilean matorral vegetation: Structure and possible maintenance mechanisms. *Oecologia* 62: 405-411.
- GAJARDO, R., 1994. La Vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 165 p.
- GASTÓ, I.; GALLARDO, A. y CONTRERAS, D., 1985. Caracterización de los pastizales de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 292 p.
- POUGET, J., CAVIEDES, E., HAMELIN, PH., REMY, D., MATHIEU, R., LIRA, V. y ALVA-REZ, D., 1996. Ambiente árido y desarrollo sustentable: La Provincia de Limarí. Univ. de Chile, Fac. de Cs. Agr. y Forest./ORSTOM. París - Santiago, 103 p.
- ROBLES, A. B., ALLEGRETTI, L. I. y PASSERA, C. B., 2001. *Coronilla Juncea* is both a nutritive fodder shrub and useful in the rehabilitation for abandoned Mediterranean marginal farmland. *Journal of Arid Environments*, 50: 381-392.
- ROMERO H., 1985. Geografía de los climas. Tomo XI. Colección Geografía de Chile, Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile, 244 p.
- ROSS, S., 1990. A course in simulation. Macmillan Publishing Co., New York.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. DEERING, D. W. y HARLAN, J. C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371 p.
- SALAS E., C., 2002. Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque*, Vol. 23, N°. 2, 81-92. ISSN 0717-9200.
- SALISBURY, J. W. y D'ARIA, M., 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 mm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 42, 83-106.
- TUCKER, C. J., 1979. Red and infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.