
DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE BOSQUE NATIVO MEDIANTE ANÁLISIS ESPACIAL EN SIG. ESTUDIO DE CASO: TIPO FORESTAL ROBLE-RAULÍ-COIGÜE EN CHILE

ROBERTO GARFIAS S., MIGUEL CASTILLO S., MANUEL TORAL I.,
CAROLINA ADASME G. y RAFAEL NAVARRO C.

RESUMEN

Se determina la distribución potencial de bosque nativo correspondiente al Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe en la zona centro-sur de Chile, utilizando herramientas de análisis espacial, particularmente el modelo de distribución potencial de máxima entropía (Maxent). La integración de la información ambiental y un modelo geoestadístico basado en el criterio de máxima entropía identifica las variables más importantes que explican la presencia de este Tipo Forestal. Al analizar cinco regiones donde se distribuye naturalmente Roble-Raulí-Coigüe se observa una importante potencialidad principalmente en las regiones de la Araucanía y de Los Ríos, siendo la región de

la Araucanía la que presenta las mejores condiciones geográficas y ambientales para el crecimiento y desarrollo potencial de estas especies. El presente estudio contribuye a disponer de antecedentes geográficos más fiables respecto a la conservación de estos bosques ya que, entre otras acciones, se puede enfatizar la protección en las zonas donde se presentan las mejores condiciones para su crecimiento. La metodología aquí aplicada es replicable hacia otras regiones, adaptando los criterios territoriales y escalas de análisis a incorporar en el sistema de información geográfica.

Los bosques templados de Chile presentan una gran diversidad de flora y fauna, y una multitud de hábitats para la vida silvestre, lo que genera un alto nivel de endemismo, por lo que son considerados como *hotspots* de biodiversidad (Myers *et al.*, 2000). Estos valiosos ecosistemas se han visto afectados por diversos procesos naturales y antropogénicos que han resultado en la reducción del hábitat de la vida silves-

tre, problemas ecológicos y la degradación de los servicios ambientales (Moreno *et al.*, 2011). Gran parte de los bosques de Chile pertenecen a estos ecosistemas, entre los que se encuentran los bosques del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe, los cuales constituyen un caso de estudio especial debido a su escasez (Donoso, 2007). Este Tipo Forestal corresponde a renovales y bosques puros o mezclados de las especies Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.)

Oerst.), Raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. & Endl.) Oerst.) y Coigüe (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.). Se trata de un bosque de alto interés económico que no existía originalmente en Chile, sino que se ha formado debido a la acción alteradora del hombre, a través de la tala masiva y de los incendios (Donoso, 1981). El Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe presenta tres subtipos, donde cada uno de ellos posee una caracterización estructural y una diná-

PALABRAS CLAVE / Bosques Templados de Chile / Conservación / Máxima Entropía / Roble-Raulí-Coigüe / Sistema de Información Geográfica /

Recibido: 13/03/2013. Modificado: 23/09/2013. Aceptado: 25/09/2013.

Roberto Garfias S. M.C. en Agroforestería, Universidad Autónoma Chapingo, México. Académico e Investigador, Universidad de Chile. Dirección: Departamento de Gestión Forestal y su Medio Ambiente, Universidad de Chile. Casilla 9206, Santiago, Chile. e-mail: rgarfias@uchile.cl

Miguel Castillo S. Mg. en Geografía, Universidad de Chile. Doctor en Recursos Naturales, Universidad de Córdoba, España. Académico e Investigador, Universidad de Chile.

Manuel Toral I. Doctor Ingeniero Forestal y Recursos Naturales, Universidad de Córdoba, España. Académico e Investigador, Universidad de Chile.

Carolina Adasme G. Licenciada en Ingeniería. Forestal. Universidad de Chile.

Rafael Navarro C. Doctor Ingeniero de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, España. Académico e Investigador, Universidad de Córdoba, España.

mica característica. Los tres subtipos son:

Subtipo renoval y bosque puro secundario. En estos renovales no se encuentra, en general, regeneración abundante, simplemente porque se trata de bosques que están en proceso de establecimiento y competencia, no son maduros y son pocos los árboles productores de semillas. En los bosques más viejos la regeneración se establece sobre troncos caídos (Donoso, 1981).

Subtipo remanentes originales: De los bosques originales quedan sólo algunos bosquetes originales de carácter relicto. Además de su valor cultural, científico, estético y paisajístico, estos rodales tienen valor silvicultural porque pueden constituir el punto de partida para la recreación de un recurso que es de valor económico (Donoso, 1981).

Subtipo bosques degradados: Gran parte de los rodales de este Tipo Forestal han experimentado diferentes grados de alteración que han sido determinados por distintos niveles de extracción de algunas de las especies componentes. Se produjeron distintas situaciones cuando se abrió fuertemente el dosel, como la introducción de especies invasoras, y cuando la extracción fue moderada, como el cambio de composición del bosque (Donoso, 1981). En este contexto, el estudio espacio temporal de este tipo de bosques se constituye como una actividad primordial para la conservación y uso sustentable. Actualmente, con las técnicas de manejo y análisis de información espacial, es posible evaluar con mayor precisión la distribución territorial de este tipo de bosques en el sur de Chile.

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten asociar rápidamente las variables climáticas, ecológicas y topográficas con puntos de presencia de la especie. Con esto es posible predecir la distribución de las especies en el contexto del análisis de biodiversidad (Moreno *et al.*, 2011). El perfeccionamiento de técnicas estadísticas aplicadas y los SIG permiten analizar objetivamente los patrones espaciales de presencia de organismos y los modelos de distribución de especies. Estos modelos permiten inferir zonas potencialmente idóneas en función de sus características, usando datos reales de presencia (Mateo *et al.*, 2011). Al hablar de distribución deben distinguirse dos categorías diferentes: la real (actual) y la potencial. La distribución real se refiere a los sitios en los que se han observado o colectado indi-

viduos y la potencial hace alusión a las áreas que tienen condiciones ambientales muy similares a los sitios donde se encuentran las especies y que tienen muy altas probabilidades de estar ocupadas por estas mismas (Gómez, 2010). Los modelos de distribución de especies utilizan métodos cuantitativos para inferir los requerimientos ambientales de establecimiento a partir de condiciones actuales (Wisz *et al.*, 2008). Dichos modelos se pueden generar a través de atributos climáticos, topográficos y ecológicos de la zona de estudio (Moreno *et al.*, 2011) y son una importante técnica de análisis biológico con aplicaciones en planificación de conservación y reserva, ecología, evolución, epidemiología, manejo de especies invasoras, entre otros campos (Phillips *et al.*, 2006). En los últimos años se han desarrollado aplicaciones informáticas para realizar modelos de distribución potencial, tales como Bioclim, DOMAIN, GARP, Maxent, entre otros, convirtiéndose en importantes herramientas en biología de la conservación y ecología del paisaje (Contreras *et al.*, 2010).

El propósito general de los modelos estadísticos es ser utilizados para el desarrollo de modelos cuando los datos de presencia y ausencia están disponibles (Phillips *et al.*, 2006). Sin embargo, los datos de ausencia de una especie en una localidad son muy difíciles de demostrar (Chefaoui *et al.*, 2005) por lo que los modelos que requieren sólo de los datos de presencia son altamente valiosos (Phillips *et al.*, 2006). Uno de los modelos de distribución de especies más utilizado, que sólo requiere datos de presencia, es el modelo de máxima entropía (Maxent; Moreno *et al.*, 2011). Pese al frecuente uso de los modelos de distribución, los registros de presencia disponibles para ciertas especies con el fin de generar las predicciones es a menudo limitado. En este sentido, Maxent presenta un buen nivel de predicción a través de todos los tamaños de muestras (Wisz *et al.*, 2008), funcionando de excelente manera cuando el muestreo es pobre (Costa *et al.*, 2010). El modelo Maxent es un método de propósito general para hacer predicciones o inferencias a partir de información incompleta. El método consiste en estimar la distribución de una especie encontrando la probabilidad de distribución de máxima entropía, sujeto a un conjunto de restricciones que representan la información incompleta acerca de la distribución (Phillips *et al.*, 2006). Maxent destaca dentro de diversos al-

goritmos para predecir distribuciones geográficas, sin mostrar fallos y proporciona en sus resultados, además de los modelos, la significancia de cada variable ambiental en el modelo de predicción (Ortega-Huerta, 2008). Además, presenta una serie de ventajas, siendo una de las más importantes el que requiere sólo de los datos de presencia de la especie, que en conjunto con la información ambiental puede desarrollar el estudio completo, al tiempo que puede utilizar variables continuas y discretas a la vez, pudiendo incorporar interacciones entre ellas. Como ventaja, además, se garantiza la obtención de la óptima (máxima entropía) distribución probable, puesto que cuenta con el desarrollo de eficientes algoritmos para esto (Phillips *et al.*, 2006). En el presente estudio se determina la distribución potencial del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe en la zona centro-sur de Chile, utilizando el modelo de distribución potencial de máxima entropía, a través de la identificación y selección de las variables ambientales más explicativas para el desarrollo y distribución de este tipo de bosque. El método aquí utilizado puede ser aplicado sin problemas en otro tipo de bosques o ecosistemas, incorporando las modificaciones necesarias en relación a los puntos de presencia de la especie.

Material y Métodos

Área de estudio

El Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe se distribuye en la zona centro-sur de Chile, desde la región del Maule hasta la de Los Lagos. Se desarrolla entre los 36°30'S y los 40°30'S, entre 100 y 1000msnm en ambas cordilleras (Donoso, 1981). De acuerdo a la información oficial procedente del catastro de bosque nativo (Conaf, 2011) se trata de una superficie de ~1,46×10⁶ha (Figura 1).

Variables ambientales y topográficas

Las variables ambientales y topográficas utilizadas en el modelo se componen de coberturas en formato *raster*, las que pueden ser divididas en dos grandes grupos, las climáticas y las topográficas (Tabla I). De la cartografía realizada con el Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile (Conaf-Conama-Birf, 1997; Conaf, 2011), para las regiones Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos se obtuvieron las capas de información de altitud, exposición y

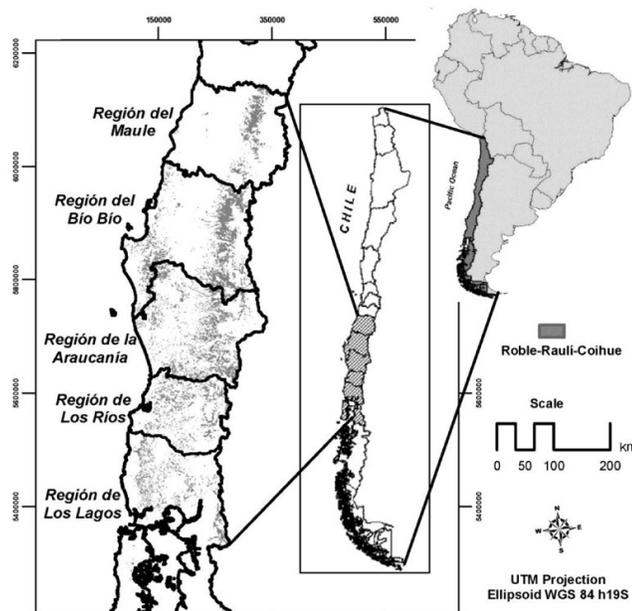


Figura 1. Área de estudio. Chile Centro-Sur.

pendiente. Las capas de las variables erosividad, erodabilidad, geología y geomorfología se extrajeron del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA, 2013). Por último, la información de las variables climáticas se extrajeron de WorldClim (Global Climate Data, 2013), desde donde se obtuvieron las capas de las variables bioclimáticas, de precipitaciones, y de las temperaturas máximas, mínimas y medias.

Fases del proceso

Las cubiertas digitales establecidas para el área de estudio se transformaron a formato *raster*, con extensión ASCII, ya que este es el formato que se requiere para el software Maxent. El tamaño de celda a utilizar fue de 30'' (~1km) para todos los niveles de información de descarga. En consideración al estándar geográfico de los datos expresados para Chile, toda la información fue transformada al sistema UTM, Datum WGS84, Huso 19 Sur. A partir de la información obtenida desde el Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile, se establecieron los 'puntos de presencia', que corresponden a localizaciones en donde se tiene la certeza de la existencia del tipo forestal en estudio. Sobre esta base se seleccionaron aleatoriamente los datos necesarios para el análisis, dentro de los cuales se probaron distintos tamaños de muestra, con el fin de determinar y definir el valor que entregara el mejor ajuste al modelo (Figura 2).

Modelo Maxent

Se trata de un método cuyo propósito general es establecer predicciones o inferencias a partir de información incompleta (Phillips *et al.*, 2006) como, por ejemplo, predecir modelos de distribución de especies con base en las condiciones ambientales más significativas (Moreno *et al.*, 2011) mediante el cálculo de la distribución de máxima entropía, que es la más cercana a la uniforme, sujeto a una serie de limitantes que representan la información incompleta acerca de la probabilidad objetivo (Phillips *et al.*, 2006). Se puede utilizar cuando se cuenta sólo con los datos de presencia de la especie en estudio. Cuando este modelo es aplicado, los píxeles representan el área de estudio en el cual se define la probable distribución. Los píxeles donde se tiene certeza de que se encuentra la especie en estudio constituyen los puntos de muestreo (puntos de presencia) y las características son las variables climáticas, topográficas y otras funciones de las mismas (Phillips *et al.*, 2006).

Al momento de utilizar el modelo de máxima entropía se establece un espacio 'x' que representa el conjunto de celdas que cubren el área de estudio. Cada celda establecida en la cuadrícula 'x' (x_1, x_2, \dots, x_n) contiene la información proporcionada por las variables ambientales climáticas y topográficas más significativas para la probabilidad de distribución en función al área de estudio, $P(x)$, lo que se lleva a cabo a través del enfoque de la máxi-

TABLA I
CONTRIBUCIÓN DE VARIABLES AL ANÁLISIS GEOGRÁFICO DE POTENCIALIDAD

Topográficas	Pendiente
	Exposición
	Altitud
	Erodabilidad
	Erosividad
	Geología
Climáticas	Geomorfología
	Temperatura máxima mensual
	Temperatura mínima mensual
	Temperatura promedio mensual
	Precipitación mensual
	Temperatura promedio anual
	Temperatura promedio diaria
	Isoterma
	Temperatura estacional
	Temperatura máxima del mes más cálido
	Temperatura mínima del mes más frío
	Rango de temperatura anual
	Temperatura promedio del trimestre más seco
	Temperatura promedio del trimestre más húmedo
	Temperatura promedio del trimestre más cálido
	Temperatura promedio del trimestre más frío
	Precipitación anual
	Precipitación del mes más seco
	Precipitación del mes más húmedo
	Precipitación estacional
	Precipitación promedio del trimestre más seco
Precipitación promedio del trimestre más húmedo	
Precipitación promedio del trimestre más cálido	
Precipitación promedio del trimestre más frío	

ma entropía de las características ambientales (Moreno *et al.*, 2011). La tarea del modelo es predecir la idoneidad del medio ambiente para la especie como una función de las variables ambientales dadas (Phillips *et al.*, 2006).

La distribución del modelo Maxent se establece a partir de la

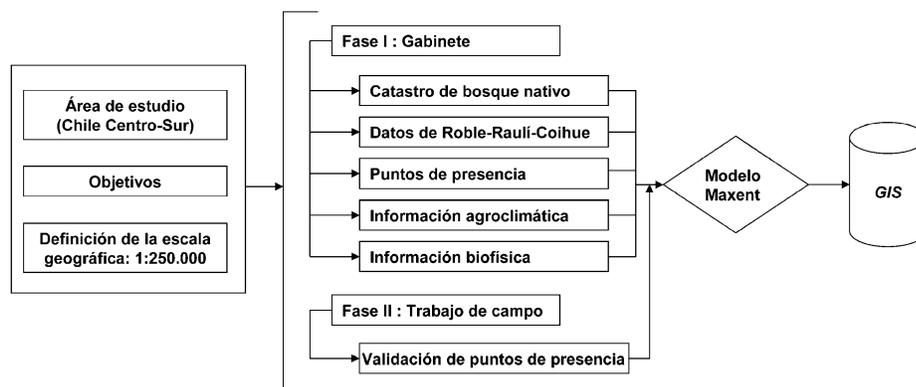


Figura 2. Diagrama del proceso.

TABLA II
CALIDAD DE MODELO A TRAVÉS DEL
ÍNDICE DE ÁREA BAJO LA CURVA

N	AUC	AUC (validación)	N	AUC	AUC (validación)
300	0,865	0,841	900	0,836	0,839
350	0,862	0,851	1000	0,842	0,814
400	0,880	0,802	1500	0,829	0,796
450	0,855	0,825	2000	0,813	0,794
500	0,863	0,830	2500	0,802	0,788
600	0,85	0,828	3000	0,789	0,778
700	0,846	0,822	5000	0,761	0,748
800	0,842	0,822	10000	0,703	0,704

información que se introduce al modelo, las celdas de la cuadrícula 'x' contienen la información de todas las variables significantes. El software permite establecer una muestra de datos para la verificación del modelo; se utiliza generalmente el 25% de la muestra para validación. Además, Maxent, utiliza el índice del área bajo la curva (AUC) para evaluar el modelo estadístico, ya que éste es uno de los índices más frecuentemente utilizado para medir la calidad de modelos (Moreno *et al.*, 2011). Las configuraciones que se pueden determinar en el modelo Maxent afectan la exactitud de éste, puesto que el modelo puede trabajar con variables ambientales simples o complejas; el modelar con variables complejas permite ajustar características más complejas, sin embargo, pueden requerir más datos. La complejidad del modelo puede ser controlada con la elección de las variables, además, Maxent presenta, dentro de su configuración, un operador denominado 'regularización de parámetros' que permite evitar la sobreposición de variables (*overfitting*) permitiendo evitar el efecto perjudicial de esto sobre la predicción (Phillips y Dudík, 2008).

Selección del tamaño de muestra

La muestra fue obtenida a partir de los puntos de presencia, en cuyo caso se dispuso de un N=10000, y que corresponden a datos fiables que representan las localizaciones que por condiciones ambientales y geográficas para el establecimiento del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue, entran al sistema como conjunto predictivo. Paso siguiente fue medir la capacidad de ajuste de Maxent como modelo a estos datos. De la sucesión de iteraciones se obtuvo que un conjunto de 400 puntos generan un AUC de 0,880, pero que posteriormente en el proceso de validación (AUC validación; Tabla II), se obtiene un valor de 0,802 inferior a 0,830 obtenido a partir de

N=500. Por esta razón, se establece un valor de 500 como conjunto predictivo para el modelo, en cuyo caso se consideraron 375 puntos para la estimación (75%) y otros 125 (25% de la muestra) para la validación.

Resultados

Variables de entrada al modelo. Distribución actual

La base de información de entrada a Maxent descrita en la Tabla I, es la que normalmente se ha utilizado para el estudio de potencialidad territorial de especies vegetales (Ortega-Huerta y Peterson, 2008; Kumar y Stohlgren, 2009; Costa *et al.*, 2010; Moreno *et al.*, 2010; Torres y Jayat, 2010). Los autores coinciden en que las variables 'temperatura mínima del mes de enero' y 'precipitaciones del mes de septiembre', presentan frecuentemente altos niveles de significación en la distribución final que entrega Maxent. Aún cuando sólo representan referencias, se consideraron todas las variables ambientales disponibles para el área de estudio, conformando 30 vectores de datos clasificados en 7 de tipo topográficos y otros 23 de tipo bioclimáticos. De esta forma y considerando los 500 puntos de presencia se efectuó un análisis de componentes principales en Maxent para la distribución actual del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue, que consiste en el cálculo de la matriz de covarianza y la rotación de los vectores rotados??? (matriz varimax), como parte de los procesos necesarios para disminuir correlaciones que pudiesen perjudicar la calidad final del modelo. La varianza total explicada se traduce en la generación de cuatro componentes que explican en casi un 98% la variabilidad total de la pobla-

ción de datos. El primer componente principal representa la asociatividad geográfica de Roble-Raulí-Coihue con las temperaturas medias; el segundo componente con las temperaturas extremas y las precipitaciones medias, el otro porcentaje de variabilidad lo absorben el tercer y cuarto componente principal que explican la distribución basada en la relación de topografía (altitud), con las precipitaciones medias presentes en áreas de interior de la precordillera. Esto se ve reflejado en el SIG mediante el análisis de los píxeles para el área asociada a los puntos de presencia y los antecedentes de distribución potencial disponibles de la bibliografía.

Distribución potencial

Un análisis complementario en Maxent consistió en modelar la distribución potencial de Roble-Raulí-Coihue a base de los mismos puntos de presencia, pero ahora condicionado a un análisis factorial con 1500 iteraciones para converger el modelo al infinito, es decir, sin descartar ninguna proporción de la varianza explicada para la rotación de componentes principales. De este análisis geográfico se determinó que la explicación de la potencialidad se explica en un 99,8% para cinco variables geográficas (Tabla III). Dentro de estas variables la que presentó mayor porcentaje de contribución fue la 'temperatura mínima de enero', con un porcentaje de contribución de 30%, seguida por la variable de 'promedio mensual de temperatura', con un porcentaje de contribución de 24,5%. El resto de las variables explica un 1,2% de la varianza de datos al interior del modelo de potencialidad.

El test *Jackknife* (Figura 3) entregado por Maxent muestra la contribución de las variables expresada en términos de ganancia estadística. Se

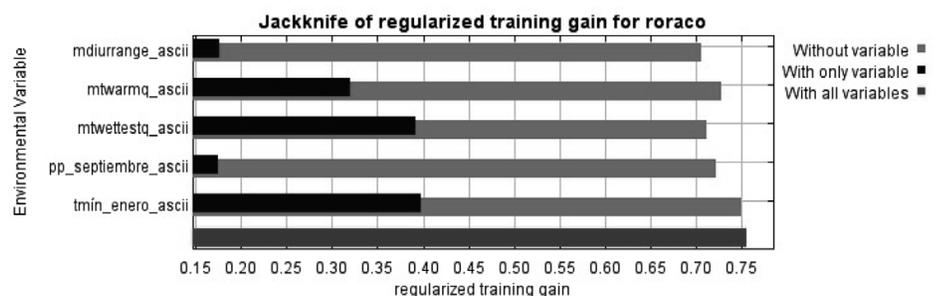


Figura 3. Test de *Jackknife*. Ganancia estadística en las variables geográficas. 'miurrange': 'promedio mensual de temperatura', 'mtwarmq': 'promedio de temperatura del cuartil más cálido', 'mtwetestq': 'promedio de temperatura del cuartil más húmedo', 'pp_septiembre': 'promedio de precipitación del mes de septiembre', 'tmin_enero': 'temperatura mínima promedio del mes de enero'.

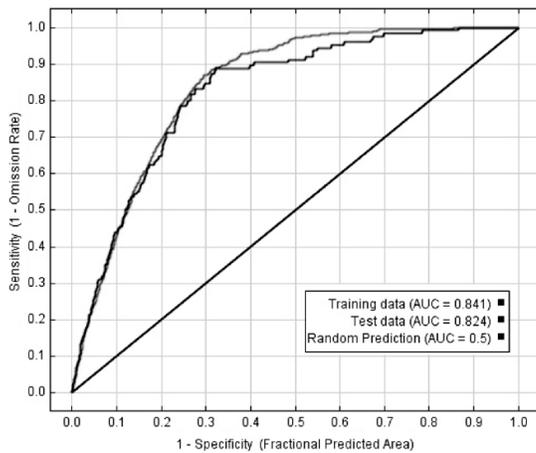


Figura 4. Gráfico curva operacional (ROC: *receiver operating characteristic*).

determinó que la variable de mayor significación es la ‘temperatura mínima del mes de enero’, que por lo tanto contiene mayor información útil por sí sola. La segunda variable con mayor ganancia es el ‘promedio de temperatura del cuartil más húmedo’, mostrándose muy cercana a la significancia que muestra la primera. La variable que más disminuyó su ganancia cuando fue omitida del resto, fue el ‘promedio mensual de temperatura’ por lo que se deduce que es la que presenta más información que no se encuentra contenida en el resto de las variables.

En cuanto a la calidad del modelo, con la distribución potencial determinada por las cinco variables seleccionadas, se presenta la curva operacional o curva ROC (Figura 4). La curva superior (*training data*) es la curva de entrenamiento, la cual representa el ajuste del modelo a los datos de muestreo que corresponde al 75% de los 500 puntos de presencia; en este análisis el valor obtenido de AUC fue de 0,841. La curva inferior (*test data*) representa el ajuste del modelo a los datos de muestreo, que corresponde al 25% restante de los datos. Esta curva presenta un AUC de 0,824.

La consideración de los puntos de presencia en las cinco regiones del país permite que pueda ser determinada la superficie potencial y la proporción de cambio respecto a la superficie actual.

TABLA III
CONTRIBUCIÓN DE VARIABLES AL ANÁLISIS GEOGRÁFICO DE POTENCIALIDAD

Variable	Porcentaje de contribución*
Temperatura mínima del mes de enero	30,0
Promedio mensual de temperatura	24,9
Temperatura promedio del cuartil más húmedo	18,4
Precipitación promedio del mes de septiembre	13,6
Temperatura promedio del cuartil más cálido	13,0

* Resto de las variables: 1,2%.

Para ello se definió un umbral o punto de corte de superficie, que consistió en la contabilización de todos los píxeles establecidos con base en el análisis de componentes principales para los 500 puntos iniciales, a base de los porcentajes de varianza explicada. Siguiendo las proporciones indicadas en la Tabla III, un valor de ~40% en incremento medio para las cinco regiones (67.550ha) fue calificado como umbral sobre el cual se calificó la característica de incremento potencial. Esta pro-

porción indudablemente varía, presentando la mayor dispersión la región de la Araucanía. Esto es coherente si se considera que las condiciones naturales para el crecimiento de Roble-Rauli-Coihue son más favorables en aquellas áreas donde los puntos de presencia tienen una mayor densidad, principalmente asociadas a un clima templado subhúmedo con una marcada estacionalidad mediterránea. La región de Los Ríos es la única que se encuentra por debajo del umbral de corte, al contar con sólo 24.727ha de incremento potencial si se comparan las cifras actuales y lo pronosticado. Ello representa una variación incremental de 13,4%, atribuible principalmente a que las áreas se encuentran ecológicamente ocupadas en su mayoría por renovales y bosques altamente intervenidos para extracción de leña, lo cual supone una escasa variación en superficie, y a la condición misma del bosque.

La superposición de los mapas de distribución actual (Figura 5) y distribución potencial (Figura 6), determinó la superficie de bosque actual que experimenta variaciones respecto al bosque potencial, la superficie de bosque que potencialmente podría establecerse y la superficie de bosque que se mantiene, es decir, la superficie que coincide en el bosque actual y potencial (Figura 7; Tabla V). En cuanto al bosque actual se establece que en su conjunto, el Tipo Forestal Roble-Rauli-Coigüe, mantendría un total de 1.468.476ha. Lo interesante del modelo predictivo, es que fue posible estimar un establecimiento potencial de 2.391.972ha de bosque, concentradas principalmente en la sección central de la Región de la Araucanía y precordillera de Los Andes (Figura 6).

Discusión

En Chile, el Tipo Forestal Roble-Rauli-Coigüe presenta una superficie potencial

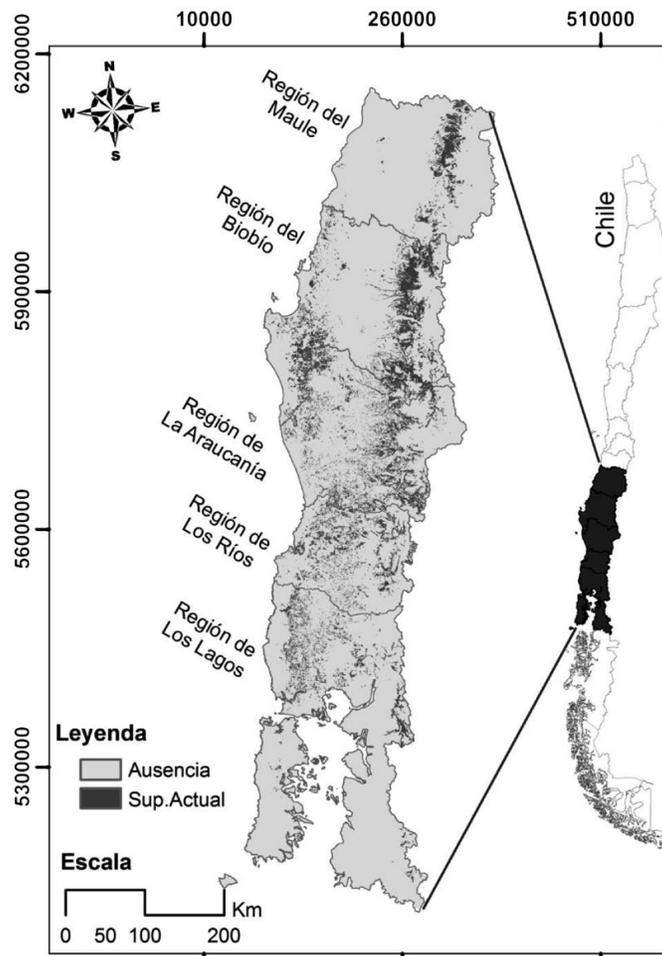


Figura 5. Mapa de distribución actual del Tipo Forestal Roble-Rauli-Coigüe

TABLA IV
COMPARACIÓN BOSQUE ACTUAL - BOSQUE POTENCIAL

	Actual (ha)	Potencial (ha)	Incremento (ha)	Incremento (%)
Región del Maule	153.432	218.400	64.968	42,34
Región del Biobío	480.840	780.225	299.385	62,26
Región de la Araucanía	459.110	1.723.725	1.264.615	275,44
Región de los Ríos	191.732	456.455	264.723	138,06
Región de los Lagos	183.362	208.089	24.727	13,40
TOTAL	1.468.476	3.202.897	1.734.421	118,11

TABLA V
SUPERPOSICIÓN DISTRIBUCIÓN ACTUAL - DISTRIBUCIÓN POTENCIAL

	Superficie coincidente (ha)	Superficie coincidente (%)	Superficie potencial (ha)
Región del Maule	77.372	50	141.028
Región del Biobío	303.138	63	477.087
Región de la Araucanía	333.400	73	1.390.325
Región de los Ríos	81.700	43	374.755
Región de los Lagos	9.409	5	15.318
TOTAL	804.925	55	2.397.972

de 3.202.897ha, expresadas en 118% de incremento potencial (Tabla IV). De esta superficie, 804.925ha forman parte del bosque actual (55%). En general, el modelo predictivo con base en los puntos de presencia muestra que la tendencia geográfica es la concentración actual y potencial en áreas de la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes, y en menor magnitud, en el Llano Central de las cinco regiones analizadas. En tal sentido, las variables bioclimáticas de 'temperatura media anual' y 'precipitación anual', representan espacialmente el área de distribución, a diferencia de las áreas del sector central en donde la existencia de temperatura extremas y menores valores de precipitación contribuyen a que no se alcancen los requerimientos ecológicos óptimos para el crecimiento y desarrollo de estas tres especies (Infor-Conaf, 1998a, b, c; Donoso *et al.*, 1993). Se observa que las áreas de más potencialidad para Roble-Raulí-Coigüe se asocian a la Cordillera de la Costa y a las zonas bajas de la Cordillera de los Andes (Figura 6). En efecto, la Cordillera de los Andes muestra las mejores condiciones para el desarrollo y crecimiento de este tipo de bosque.

Los requerimientos ecológicos para el desarrollo potencial de las tres especies

más representativas del tipo forestal (temperatura, humedad, precipitación, características edáficas, altitud, entre otras) se concentran en la precordillera, mostrándose como el mejor escenario para su desarrollo (Infor-Conaf, 1998a, b, c).

Este estudio muestra que la zona más apta para el desarrollo del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe es la región de La Araucanía. Se establece una superficie potencial de 1.723.725ha, lo que representa un 257% de incremento potencial (Tabla IV). Esto último puede atribuirse a que el roble puede establecerse en la mayor parte de la región, debido a que las características climáticas, ecológicas y edáficas de La Araucanía no presentan restricciones para su desarrollo, excepto en las zonas altas de la Cordillera de los Andes (Infor-Conaf, 1998a). Por otra parte, diversos autores reportan que el raulí y el coigüe crecen mejor en la precordillera y en las partes bajas de la Cordillera de Los Andes, siendo la variable altitud la principal limitante para su desarrollo (Infor-Conaf, 1998b; c). La región de Los Lagos presenta condiciones menos favorables para el desarrollo de Roble-Raulí-Coigüe (Figura 6). En efecto, la predicción de establecimiento muestra la menor superficie potencial (24.727ha). Este escenario se puede explicar por dos situaciones asociadas a las bajas temperaturas. En primer lugar, la variable más restrictiva para la distribución de estas especies es 'temperatura mínima del mes de enero', lo que se suma a que la variable más restrictiva para la región de Los Lagos es la variable 'período libre de heladas' (Infor-Conaf, 1998a, b); lo anterior se expresa en baja potencialidad debido a que en la región se presentan las menores temperaturas del mes de enero, mostrando valores bajo los 3,8°C. En segundo lugar, la pequeña zona de la región donde puede establecerse Roble-Raulí-Coigüe está ligada a la variable 'promedio de temperatura mensual', determinada como la segunda variable explicativa del modelo, debido a que en esa zona es donde se muestran los valores promedios más altos registrados, con valores entre 11,3 y 13,1°C, mientras que el resto

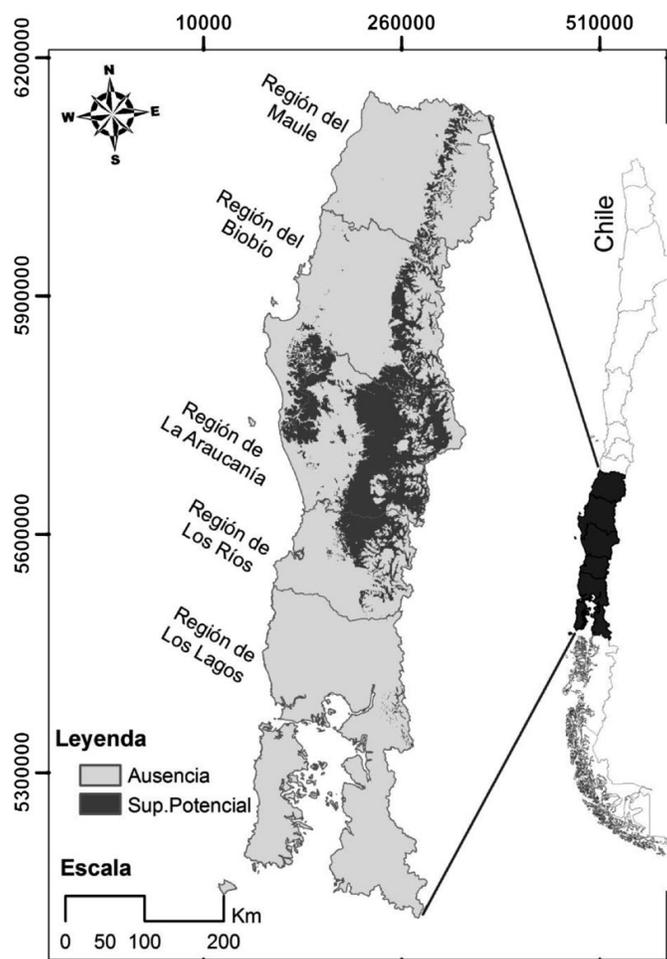


Figura 6. Mapa de distribución potencial del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe.

de la región presenta valores de temperatura promedio mensual que fluctúan entre 4 y 11°C.

Como comentario general de estos resultados cabe indicar que el modelo de máxima entropía es una herramienta muy útil para los investigadores y los gestores forestales (Moreno *et al.*, 2010) por cuanto permite ayudar en la planificación de la gestión del uso del suelo en torno a sus poblaciones existentes, descubrir nuevas poblaciones, identificar los sitios prioritarios y establecer prioridades para restaurar el hábitat natural para una conservación más eficaz (Kumar y Stohlgren, 2009). A pesar de que el Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe es de origen antropogénico, el presente estudio no hace referencia a esto, puesto que Maxent es capaz de establecer la susceptibilidad del territorio al establecimiento de las especies en cuestión tomando en cuenta sólo la información de los requerimientos ambientales.

La información entregada en este estudio es esencial para asegurar la buena conservación de la biodiversidad

que presentan los bosques templados del sur de Chile, ya que éstos son altamente susceptibles a la degradación y fragmentación (Moreno *et al.*, 2010), teniendo en cuenta, al mismo tiempo, que la superficie de Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe protegido por el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE) es de tan sólo 66.068ha, lo que corresponde al 4,5% de la superficie total (CONAF, 2011). Con el fin de conservar este importante Tipo Forestal es necesario identificar las zonas que presentan las mejores condiciones para su establecimiento, debido a que de esta forma se estaría asegurando su conservación.

Conclusiones

El Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe presenta una superficie potencial de 3.202.897ha, ligadas principalmente a la Cordillera de la Costa, en la región de la Araucanía, y a las zonas bajas de la Cordillera de los Andes, en la totalidad de su distribución. Los puntos de presencia determinan además que la zona del Llano Central

presenta características ecológicas menos propicias para Roble-Raulí-Coigüe, puesto que se observan las mayores temperaturas y los menores rangos de precipitación, lo que impediría que se alcancen los requerimientos ecológicos necesarios para las tres especies en cuestión. La región de La Araucanía es la zona más apta para el desarrollo del Tipo Forestal objeto del presente estudio, observándose un incremento potencial del 257%, que se distribuye en la Cordillera de la Costa y las zonas bajas de la Cordillera de los Andes, lo que puede deberse a la favorable potencialidad de roble en gran parte de la región y a la potencialidad de raulí y coigüe en la zona precordillerana. Más al sur, en la región de Los Lagos se pre-

sentan condiciones menos favorables para el desarrollo de las tres especies, atribuido a las bajas temperaturas de la región y a las limitaciones que ejercen éstas sobre la distribución de este Tipo Forestal. Los estudios realizados a través de Maxent son una herramienta importante en la conservación de la biodiversidad. Las distintas aplicaciones en las que se puede utilizar esta herramienta pueden ayudar a facilitar la planificación de la gestión forestal. El presente estudio contribuye a una buena conservación del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe, ya que se puede enfatizar la protección en las zonas donde se presentan las mejores condiciones para su crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Proyecto CONAF 011-2011, correspondiente al Fondo de Investigación del Bosque Nativo.

REFERENCIAS

- Chefaoui R, Hortal J, Lobo M (2005) Potencial distribution modelling, niche characterization and conservation status assessment using GIS tools: a case study of Iberian *Copris* species. *Biol. Cons.* 122: 327-338.
- Conaf-Conama-Birf (1997) *Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile*. Corporación Nacional Forestal, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile. 67 pp.
- Conaf (2011) *Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Monitoreo de Cambios y Actualizaciones. Periodo 1997-2011*. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 28 pp.
- Contreras R, Luna I, Ríos C (2010) Distribución de *Taxus globosa* (*Taxaceae*) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 83: 421-433.
- Costa G, Nogueira C, Machado R, Colli G (2010) Sampling bias and the use of ecological niche modeling in conservation planning: a field evaluation in a biodiversity hotspot. *Biodiv. Cons.* 19: 883-900
- Donoso C (1981) Tipos forestales de los Bosques Nativos de Chile. Documento de Trabajo N°38. Investigación y desarrollo forestal (CONAF/PNUD/FAO). Publicación FAO, Chile:17-20.
- Donoso C (2007) Los bosques de Chile en el contexto mundial, importancia y valor. *Bosque Nativo* 41: 14-15.
- Donoso P, Donoso C, Sandoval V (1993) Proposición de zonas de crecimiento de renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en su rango de distribución natural. *Bosque* 14: 37-55.
- Global Climate Data (2013) *Free Climate Data for Ecological Modeling and GIS*. www.worldclim.org/ (Cons. 12/2012).

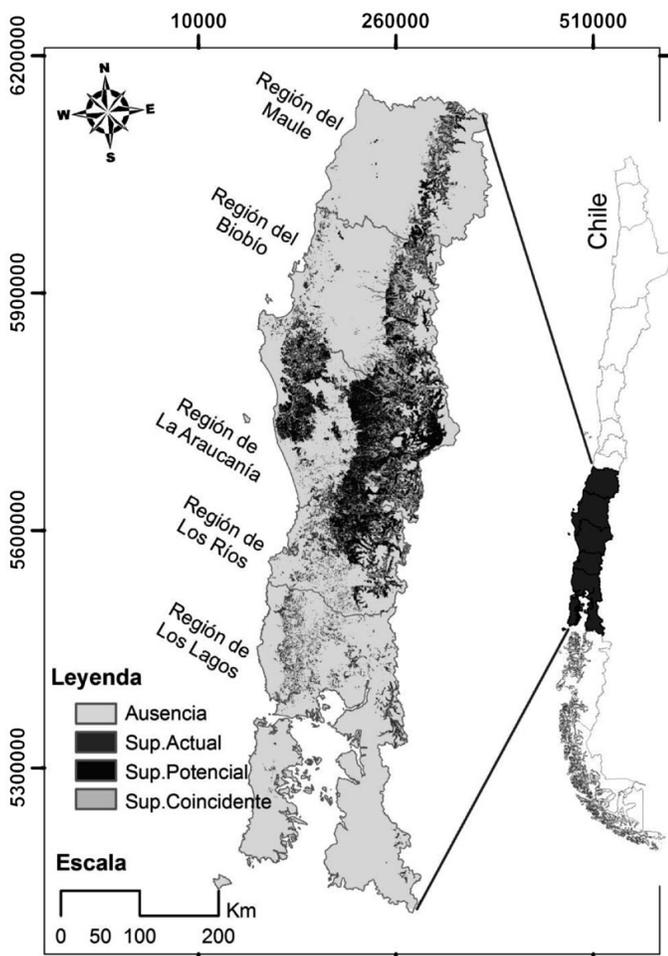


Figura 7. Mapa superposición Distribución actual - Distribución potencial

- Gomez R (2010) *Guía para la Elaboración de Mapas de Distribución Potencial* www.uv.mx/personal/mgamez/files/2010/07/guia-version-germoplasma.pdf (Cons. 09/01/2013).
- Infor-Conaf (1998a) *Potencialidad de Especies y Sitios para la Diversificación Silvícola Nacional. Monografía de Roble, Nothofagus obliqua*. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 88 pp.
- Infor-Conaf (1998b) *Potencialidad de Especies y Sitios para la Diversificación Silvícola Nacional. Monografía de Raulí, Nothofagus alpina*. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 77 pp.
- Infor-Conaf (1998c) *Potencialidad de Especies y Sitios para la Diversificación Silvícola Nacional. Monografía de Coigüe, Nothofagus dombeyi*. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 103 pp.
- Kumar S, Stohlgren T (2009) Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Ecol. Nat. Env.* 1: 94-98.
- Mateo R, Felicísimo A, Muñoz J (2011) Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 84: 217-240.
- Moreno R, Zamora R, Molina J-R, Vásquez A, Herrera M (2011) Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forest using Maximum entropy (Maxent). *Ecol. Inform.* 6: 364-370.
- Myers N, Mittermeier R, Mittermeier C, Da Fonseca G, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- Ortega-Huerta M, Peterson A (2008) Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Rev. Mex. Biodiv.* 79: 205-216.
- Phillips S, Anderson R, Schapire R (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190: 231-259.
- Phillips S, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- SINIA (2013) *Sistema Nacional de Información Territorial*. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile. <http://modulo-geo.sinia.cl/portal/inicio.php> (Cons. 02/2013).
- Torres R, Jayat JP (2010) Modelos predictivos de distribución para cuatro especies de mamíferos (*cingulata, artiodactyla y rodentia*) típicas del chaco en Argentina. *Mastozool. Neotrop.* 172: 335-352.
- Wisn M, Hijmans R, Li J, Peterson A, Graham C, Guisan A, NCEAS Predicting Species Distributions Working Group (2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Div. Distrib.* 14:763-773. Natquodi, mo inatus o

ACTUAL AND POTENTIAL DISTRIBUTION OF NATIVE FORESTS BY MEANS OF GIS SPATIAL ANALYSIS. CASE STUDY: FOREST TYPE *ROBLE-RAULÍ-COIGÜE* IN CHILE

Roberto Garfias S., Miguel Castillo S., Manuel Toral I., Carolina Adasme G. and Rafael Navarro C.

SUMMARY

The potential distribution of native forest corresponding to the 'Forest Type Roble-Raulí-Coigüe' in the Central-South zone of Chile is determined using spatial analysis tools, particularly the model of potential distribution of maximal entropy (Maxent). The integration of environmental information and a geostatistical model based on the criterion of maximal entropy identifies the most important variables that explain the presence of this Forest Type. When analyzing five regions where the Roble-Raulí-Coigüe is naturally distributed an important potential is observed, mainly in the regions of Araucanía and

Los Ríos, the first of them presenting the best geographical and environmental conditions for the growth and potential development of these species. The present study contributes to set out more reliable geographical data related to the conservation of these forests since, among other actions, protection can be emphasized in the areas that present the best growth conditions. The methods applied herein can be replicated in other regions, adapting the territorial criteria and analysis scales to be incorporated into the geographical information system.

DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ATUAL E POTENCIAL DE BOSQUE NATIVO MEDIANTE ANÁLISE ESPACIAL EM SIG. ESTUDO DE CASO: TIPO FLORESTAL *ROBLE-RAULÍ-COIGÜE* NO CHILE

Roberto Garfias S., Miguel Castillo S., Manuel Toral I., Carolina Adasme G. e Rafael Navarro C.

RESUMO

Determina-se a distribuição potencial de bosque nativo correspondente ao Tipo Florestal Roble-Raulí-Coigüe na zona centro-sul do Chile, utilizando ferramentas de análise espacial, particularmente o modelo de distribuição potencial de máxima entropia (Maxent). A integração da informação ambiental e um modelo geo estatístico baseado no critério de máxima entropia identificam as variáveis mais importantes que explicam a presença deste Tipo Florestal. Ao analisar cinco regiões onde se distribui naturalmente Roble-Raulí-Coigüe se observa uma importante potencialidade principalmente nas regiões da Arauca-

nia e de Los Rios, sendo a região da Araucanía a que apresenta as melhores condições geográficas e ambientais para o crescimento e desenvolvimento potencial destas espécies. O presente estudo contribui a dispor de antecedentes geográficos mais confiáveis relativos à conservação destes bosques já que, entre outras ações, se pode enfatizar a proteção nas zonas onde se apresentam as melhores condições para seu crescimento. A metodologia aqui aplicada é replicável a outras regiões, adaptando os critérios territoriais e escalas de análise para incorporá-los no sistema de informação geográfica.