

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**GENERACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN REMOTA
DE SUELOS MEDIANTE UN MODELO PREDICTIVO. REGIÓN DE
COQUIMBO, CHILE**

ORLANDO ANTONIO MACARI ROSALES

**Santiago, Chile
2015**

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**GENERACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN REMOTA
DE SUELOS MEDIANTE UN MODELO PREDICTIVO. REGIÓN DE
COQUIMBO, CHILE**

**DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY OF REMOTE SOIL SENSORY BY A
PREDICTIVE MODEL. COQUIMBO REGION, CHILE**

ORLANDO ANTONIO MACARI ROSALES

**Santiago, Chile
2015**

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

**GENERACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN REMOTA
DE SUELOS MEDIANTE UN MODELO PREDICTIVO. REGIÓN DE
COQUIMBO, CHILE**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo

ORLANDO ANTONIO MACARI ROSALES

Profesores Guías	Calificaciones
Sr. Andrés de la Fuente D, Ingeniero Agrónomo	6,7
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,8
Profesor Evaluador	
Sr. Cristian Mattar D. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.	6,5
Sr. Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,5

**Santiago, Chile
2015**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de finalizar este proceso.

Agradezco a mis padres, Orlando Macari Hernández y Gloria Rosales Rebolledo, por el apoyo y paciencia durante todos mis años de estudio, especialmente durante el proceso de esta Memoria. También agradezco a mis tres hermanos, los cuales siempre han sido un apoyo en todos los pasos que he tomado a lo largo de mi vida.

Agradezco a mis profesores guías, Andrés de la Fuente y Oscar Seguel, ambos con una gran vocación de enseñanza, y que supieron conducir el proceso de esta Memoria a buen puerto.

También agradezco a las dos organizaciones estudiantiles que me formaron en varios aspectos de la vida, permitiendo mi desarrollo como profesional y como persona, que son Estudiantes por la Protección Animal (EPA) y Altoandino, y a su gente por supuesto, grandes amigos y compañeros de labores.

Finalmente, agradezco a mis amigos, aquellos camaradas que siempre me dieron una mano y estuvieron presentes en las buenas y en las malas.

Gracias a todos ustedes.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Antecedentes generales del área de estudio	6
Geomorfología y relieve	6
Clima.....	8
Suelos.....	8
Modelo de clasificación experto de decisión	10
Clasificación de suelos según Capacidad de Uso	13
Naturaleza del material parental	17
Geoformas del paisaje.....	21
Regímenes de humedad	23
Sistema de clasificación propuesto por el Soil Survey Staff (USDA).....	24
Modelo de simulación de régimen de humedad de Newhall (1976).....	25
Modelo de simulación del régimen de humedad de los suelos según Jarauta (1989).....	26
RESULTADOS.....	30
Clasificación según Capacidades de Uso de suelos	30
Clasificación imágenes satelitales.....	30
Determinación de Geoformas del paisaje en base a método TPI.....	33
Separación de Secuencias Geológicas Sedimentarias a partir del TPI.....	35
Determinación del régimen de humedad del suelo	37
Esquema de modelo experto de decisión	41
Resultados clasificación según Clases de Capacidad de Uso de suelos.....	45
Análisis de resultados de superficie clasificada según Capacidad de Uso.....	47
Clase I.	47
Clases II y III.	49

Clase IV.	50
Clase VI.	50
Clases VII y VIII.....	51
Suelos no clasificados.	52
Validación de resultados	57
DISCUSIÓN	60
CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXO 1	73
ANEXO 2	73
APÉNDICE 1	77
APÉNDICE 2.....	79
APÉNDICE 3.....	80
APÉNDICE 4.....	81
APÉNDICE 5.....	82
APÉNDICE 6.....	83
APÉNDICE 7.....	84
APÉNDICE 8.....	85
APÉNDICE 9.....	86
APÉNDICE 10.....	87
APÉNDICE 11	88

RESUMEN

La clasificación remota de suelos es una técnica que puede resultar de gran utilidad para generar una aproximación fidedigna de la realidad de este recurso, especialmente en condiciones donde la información es escasa, parcializada, o inexistente. Este es el caso de la Región de Coquimbo, Chile, donde una amplia superficie no ha sido clasificada en detalle en cuanto a sus suelos, tal que solo en sus valles agrícolas se han realizado estudios de carácter agrológico. En este contexto, en el presente trabajo se propuso clasificar los suelos de la Región de Coquimbo según el sistema de Clases de Capacidad de Uso de suelos. Para este fin, se utilizaron Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota para generar los insumos necesarios para ejecutar la clasificación. Se consideraron los siguientes factores de formación de suelos: Material Parental, mediante el uso de información espacializada de geología de la zona; Clima, a partir de datos de precipitaciones y temperaturas; y Relieve, referido a las pendientes y Geoformas del paisaje, estas últimas determinadas por el método “Topographic Position Index” (TPI). Con esta información, se procedió a diseñar e implementar un Modelo experto de decisión, técnica que se vale del conocimiento experto en una disciplina para generar la regla de decisión.

El modelo dio como resultado una clasificación que abarcó un 93,09% de la superficie regional, donde el restante 6,91% fue considerado como inclusiones, por representar unidades espacialmente disgregadas y fuera de contexto. La clasificación incluyó dos categorías que agruparon suelos que no fueron asignables a una Clase de Capacidad de Uso particular, pero sí a un rango: categoría Clases I a IV, y categoría Clases VI a VIII. Del total de unidades clasificadas según Clases de Capacidad de Uso, los resultados fueron los siguientes: 0,62% correspondió a Clase I; 0,74% a Clase II; 1,05% a Clase III; 5,06% a Clase IV; 11,63% a Clase VI; 36,22% a Clase VII; 26,33% a Clase VIII; 6,61% para la categoría Clases I a IV y 4,27% para la categoría Clases VI a VIII. Posterior a la obtención de los resultados, se efectuó una validación en base a consulta a un experto, evaluándose siete puntos particulares. El resultado indicó cuatro puntos que no calzaron con la clasificación realizada, lo que se debió a que dos de estos últimos se encontraron dentro de inclusiones (puntos San Julián y Maitencillo) y un tercero en una condición con limitantes químicas (punto Huentelauquén), estas últimas fuera del ámbito de predicción del modelo.

Palabras clave: Cartografía predictiva, clasificación remota, Capacidad de Uso, modelo experto de decisión.

ABSTRACT

Remote soil classification is a technique that can be useful to generate an accurate approximation of the reality of this resource, especially in spatial conditions where information is scarce, biased, or nonexistent. This is the case of the Coquimbo Region, Chile, where a large area has not been classified in detail about their soils; such that only in their agricultural valleys are soil survey studies. In this context, this work proposes soils classify of the Coquimbo Region according to Land Capability Classes system. To this goal, Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing were used to generate the inputs needed to run a classification. The considered soil formation factors with this purpose were: Parental material, for which we used specialized geology information of the area; Climate, in terms of rainfall and temperature data; and Relief, based on landscape landforms, were considered using the Topographic Position Index (TPI) method. With this information, it was proceeded to design and implement a technical expert decision model, which uses expert knowledge in a discipline to generate the decision rule.

The model resulted in a classification which covered 93.09% of the region, where the remaining 6.91% was considered inclusions, because representing spatially disaggregated units out of context. The classification included two categories with soils that were not associated to a particular Land Capability Class, but were included in a range: Classes I to IV category and Classes VI to VIII category. On the total surface classified as Land Capability Classes, the results were as follows: 0.62 % was classified as Class I; 0.74% was Class II; 1.05% was Class III; 5.06% was Class IV; 11.63% was Class VI; 36.22% was Class VII; 26.33% was Class VIII; 6.61% was Classes I to IV category and 4.27% to Class VI to VIII category. Finally, a validation was performed based on expert criteria, evaluating seven specific points. Four points were not in agreement with the original result, which was due to two of the latter were within inclusions (San Julian and Maitencillo points) and a third point was a condition with chemical limiting condition (Huentelauquén point), outside the scope of model prediction.

Key words: Predictive cartography, remote classification, Land Capability Classes, expert decision model

INTRODUCCIÓN

Las fronteras de la agricultura se han expandido. Prueba de esto es que hoy en día se ha empezado a cultivar las laderas de los cerros y a utilizar superficies donde en el pasado no se había considerado realizar actividades productivas agrícolas (Farías, 2009). Esta agricultura intensiva que se está desarrollando en laderas, conos y glacis, genera transformaciones topográficas, de cobertura vegetal y de suelo (Bäuerle *et al.*, 2010), las cuales pueden controlarse mediante el conocimiento de las limitaciones que brinda el suelo en determinada posición en el paisaje y bajo cierta condición climática. Esta situación impone la necesidad de realizar nuevos estudios que involucren los suelos que no han sido incluidos en detalle en los estudios agrológicos, que normalmente se restringen a los valles y zonas de poca pendiente (Casanova *et al.*, 2013). Por esta razón, todas aquellas zonas donde la información de suelos es escasa, debiesen ser caracterizadas mediante la aplicación de una metodología estándar y de fácil implementación.

El suelo es un recurso natural fundamental, el cual resulta de vital importancia para la agricultura (Birkeland, 1999). En él interactúan la Biósfera, Hidrósfera, Litósfera y la Atmósfera a través de su estructura porosa, cumpliendo un rol esencial en los procesos biofísicos y bioquímicos del planeta. Por esta razón, el entendimiento de la distribución y manejo de los suelos es fundamental para comprender el complejo balance de los procesos químicos y físicos que hacen posible la vida en la Tierra (Birkeland, 1999).

James Hutton, considerado el padre de la geología moderna (Minasny *et al.*, 2008), en su calidad de agricultor llegó a la conclusión de que el suelo es el sustento de la vida. Como geólogo de vocación, también concluyó que el suelo es consecuencia de un proceso donde la topografía tiene un rol fundamental. En sus palabras, “las alturas de nuestras tierras son niveladas con las costas; nuestras fértiles planicies son formadas a partir de las ruinas de nuestras montañas; y todos estos materiales que viajan, son permanentemente seguidos por el agua en movimiento, e impulsados a lo largo de la superficie inclinada de la Tierra” (Hutton, 1788; citado en Minasny *et al.*, 2008). Se entiende entonces que, desde las primeras concepciones de la geología moderna, la importancia del suelo en la dinámica de los ecosistemas terrestres y su relación con los procesos que ocurren en el paisaje, resultan ser evidentes al observador.

La Región de Coquimbo, Chile, corresponde a una zona donde únicamente los valles transversales han sido considerados en el levantamiento de información de suelos de manera detallada, abarcando una proporción de superficie menor respecto de la superficie total. Los estudios agrológicos desarrollados en la Región, a la fecha, han sido sistematizados en el marco del proyecto “Alternativas productivas frutícolas de la IV Región” (CIREN, 2005), donde se efectuó una actualización, complementación y homogeneización de los estudios de suelos realizados por diferentes instituciones en la Región de Coquimbo. Las áreas incluidas en el estudio comprenden únicamente los valles

del Elqui, Limarí, Choapa y Quilimarí, que abarcan 130.000 ha de superficie (CIREN, 2005), equivalente solo al 3,2% de la superficie regional. En este contexto, la generación de información que permita dar una mejor idea de las capacidades de uso de los suelos de la Región de Coquimbo, tanto en su extensión como en su distribución, permitiría generar conocimiento de zonas de las cuales únicamente se tiene una idea vaga y poco precisa.

Con el objeto de explicar la ocurrencia del suelo, y con ello definir y describir a este recurso bajo distintos contextos, se ha desarrollado toda una teoría basada en la observación empírica en terreno, que planteó un set de variables independientes que definen o controlan el estado o las propiedades del suelo en cualquier momento dado (Minasny *et al.*, 2008). La teoría de los factores de formación de los suelos fue planteada originalmente por Vasilli Dokuchaev (1899), la cual propone que el suelo (π) es función de tres factores de formación: el clima (K), los organismos (O) y el material parental (I) (Minasny *et al.*, 2008). Jenny (1941) posteriormente definiría el suelo como un sistema, formalizando los factores de estado (“state factors”) de formación de suelos. Este autor definió el suelo como resultado de la acción de los siguientes factores: clima (cl), organismos (o), relieve (r), material parental (p), t (tiempo), y otros factores no especificados. En palabras de Jenny (1961), “Los factores no son formadores, o creadores, o fuerzas, son variables (“state factors”) que definen el estado del sistema del suelo”. El autor sugiere que existen dos posibles métodos para resolver esta ecuación: en forma teórica y en forma empírica a partir de las observaciones en terreno (Jenny, 1941). Aquí se hace explícita la relación entre la topografía del paisaje y el suelo, donde la primera adquiere el carácter de “state factor”. Adicionalmente, también se plantea la posibilidad de desarrollar la ecuación a partir de la medición empírica en terreno.

La espacialización de la información de suelos, su relación con las formas del relieve, o geoformas, y su relación con el resto de los factores de estado, es un ejercicio que requiere la implementación de herramientas y tecnologías que tengan la capacidad de procesar y correlacionar información a nivel espacial. En respuesta a esta necesidad, se han desarrollado herramientas que se valen de la capacidad de procesamiento de información existente en la actualidad, como lo es el Mapeo Predictivo de Suelos (MPS). El MPS se define como el desarrollo de un modelo numérico o estadístico de la relación entre variables medio ambientales y propiedades del suelo, que posteriormente es aplicado a una base de datos geográfica con el fin de crear un mapa predictivo (Scull *et al.*, 2003). El uso de sensores remotos y de técnicas de fotogrametría, brindan la posibilidad de poder contar actualmente con información espacialmente explícita y digitalizada, lo que ha permitido la generación de una representación fidedigna de la superficie de la Tierra, que al ser combinada con mapas en papel digitalizados en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), logra una caracterización y análisis de un gran volumen de información (Scull *et al.*, 2003).

En el presente trabajo se aplicó un modelo experto de decisión, correspondiente a un sistema de clasificación basado en el conocimiento de los especialistas (McBratney *et al.*, 2003) con el fin de generar un MPS en la Región de Coquimbo, Chile, en base a los “state factors” definidos por Jenny (1941). Este esfuerzo requiere del uso de SIG y percepción

remota, a partir de imágenes satelitales y de modelos digitales de elevación. El desafío, adicional al diseño propio del modelo y la recopilación y generación de información relativa a los factores de formación de suelos a considerar, fue realizar este trabajo en forma remota, es decir, sin contar con información obtenida en terreno, valiéndose en su lugar de información obtenida mediante sensores satelitales.

La razón por la que se planteó este marco de trabajo, es desarrollar una herramienta que sirva para generar información de base de zonas que no cuentan actualmente con estudios acabados de suelos, lugares de los que se desconoce el potencial del suelo de sustentar cultivos agrícolas, o de sostener especies vegetales autóctonas de la zona. En definitiva, generar información que permita establecer una línea base, capaz de servir de fundamento para proyectar estudios más acabados de zonas que sean de potencial interés para la agricultura o para la conservación de flora y fauna, puede significar una ayuda no menor para la toma de decisiones sobre planes de manejo a nivel regional.

Objetivo General

Generar una metodología que permita la caracterización de suelos a distancia, utilizando Sistemas de Información Geográfica y percepción remota.

Objetivos Específicos

- Desarrollar una metodología de mapeo de suelos útil para la toma de decisiones, complementando el conocimiento experto en la ciencia del suelo con conocimiento técnico relativo a los sistemas de información geográfica.
- Generar un modelo que permita la aplicación de la metodología.
- Aplicar la metodología de caracterización de suelos en una zona donde no existan estudios agrológicos a la fecha, relativos a este recurso, de manera de validarlo mediante criterio experto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes generales del área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la IV Región de Coquimbo, Chile, ubicada entre los paralelos 29°00'S y 32°10'S, abarcando un área de 40.462 km², equivalentes al 5,3% del territorio nacional (Novoa y López, 2001). El relieve de la Región está dominado por la presencia de la Cordillera de la costa y la Cordillera de los Andes, donde la existencia de valles transversales de orientación oriente-poniente hacen desaparecer la típica depresión intermedia presente en el resto del país (Novoa, 1989). Por esta razón, la región también es conocida como la región de los valles transversales (Novoa, 1989) y es parte de la región natural denominada como “Le Chili Semiaride” (Paskoff, 1970), la cual se extiende entre los paralelos 27° y 33° de latitud Sur (Ferrando, 2002).

Geomorfología y relieve

En la región es posible reconocer cuatro grandes unidades geográfico-físicas (Paskoff, 1970): 1) la franja litoral o costera; 2) los valles fluviales transversales; 3) la media montaña y, 4) la alta montaña. De esta forma, de Norte a Sur, los valles fluviales transversales son los valles de Elqui, Limarí, Choapa y Quilimarí. A ellos se agrega meridionalmente la cuenca del río Aconcagua, último de los valles denominados “transversales”, pero que en términos administrativos pertenece a la V Región de Valparaíso (Ferrando, 2002).

Respecto a las unidades geográfico-físicas, Cepeda *et al.* (2008), en base a la descripción hecha por Paskoff (1970), realiza una descripción de cada una: la franja litoral o costera está compuesta por terrazas marinas, construidas ya sea a partir de depósitos o de procesos de labrado de las rocas litorales, caso de la franja de la bahía de Coquimbo, la cual se extiende aproximadamente 25 km adentro, hacia el interior del valle; la media montaña, en tanto, comprende a los sectores de interfluvios o serranías presentes en las hoyas hidrográficas, correspondientes a macizos montañosos de altitud regular que se encuentran muy disectados por la erosión fluvial; por último, la alta montaña constituye la sección más oriental y de mayor altitud de la hoya hidrográfica, que corresponde a la alta montaña de Los Andes, donde se originan los cursos de agua que forman ríos, tales como el Elqui y el Limarí.

La alta montaña se ubica en la zona de la cordillera de los Andes, distinguiéndose por sus alturas y su capacidad de retención nival. La cordillera de la IV Región se caracteriza por la ausencia de vulcanismo cuaternario. Sus cumbres superan los 3500 m, alcanzando los 6000 m sobre la frontera con Argentina. Esta zona manifiesta presencia de actividad glacial,

tanto en sus laderas como en los valles que surcan actualmente la región ocupados por ríos, cuyas nacientes son los circos glaciares de la cordillera (Cepeda *et al.*, 2008). El límite occidental está marcado por procesos tectónicos de solevantamiento andino, caso de la falla de Vicuña, que se extiende desde la Serena ($29^{\circ}54'S-71^{\circ}15'O$) hasta la localidad de los Andes ($32^{\circ}50'S-70^{\circ}36'O$) (Novoa y López, 2001).

La montaña media corresponde al ambiente montañoso que agrupa los relieves que no superan los 3000 msnm, separado de la Cordillera de los Andes por la falla de Vicuña. Esta unidad aparece como un relieve desmembrado y discontinuo, efecto de la disección fluvial. El límite Occidental de la montaña media queda demarcado por la franja litoral y los relieves asociados a ella. Una excepción a la norma la constituyen algunas áreas altas y planiformes que son testigos de la superficie de erosión anterior al solevantamiento de los Andes (Novoa y López, 2001).

La franja litoral es una zona que comprende superficies de abrasión y terrazas de sedimentación marina y fluviomarina, áreas solevantadas tectónicamente como Altos de Talinay ($30^{\circ}28'S-71^{\circ}38'O$), así como depósitos más actuales de playas, barras litorales y campos dunarios. En esta unidad hay sistemas de bahías, desembocaduras de ríos y otros cursos menores. En la franja litoral norte, destaca la amplia superficie de sedimentación fluviomarina, vinculada a la quebrada Los Choros. Un caso particular es Altos de Talinay, área que presenta un conjunto de plataformas de abrasión marina que se correlaciona con los niveles de sedimentación de las bahías de Coquimbo y Tongoy ($30^{\circ}16'S-71^{\circ}33'O$). Al sur de los Vilos, reaparecen las terrazas marinas, que son parte de la línea costera regular que se observa más al sur (Novoa y López, 2001).

En cuanto a los grandes valles fluviales, geomorfológicamente corresponden a unidades cuyas formas se generan por la actividad de aguas corrientes y con alturas que no sobrepasan los 300 m en su curso inferior. Son formas amplias y de baja pendiente, sobre las cuales, junto con sus proyecciones en la costa, albergan a la mayor proporción de la población regional y la actividad agrícola. De esta forma, los patrones que identifican a los grandes valles de los ríos Elqui, Limarí y Choapa, son el tamaño de la cuenca hidrográfica, el caudal de los ríos y la existencia de suelos, variables en su cantidad y calidad (Paskoff, 1993). Estos valles concentran la mayor proporción de superficie con aptitud agrícola, con 24.000 ha en el valle del Elqui, 45.000 en el Limarí y 20.000 en el Choapa (Novoa y López, 2001).

La Región de Coquimbo, dadas sus cualidades geográfico físicas antes señaladas, presenta marcados contrastes en su paisaje natural. Esto deriva de la existencia de escurrimiento perenne en los valles mencionados, generando ejes verdes, cuales “oasis longitudinales”, y de la virtual ausencia de agua en los amplios relieves que forman las divisiones entre ellos. Por esta razón, la población y la actividad productiva primaria de las serranías han dependido de las ocasionales y reducidas lluvias de invierno (Ferrando, 2002).

Clima

El clima de la IV Región responde a su ubicación dentro de la zona semi-árida del Oeste de Sudamérica, ubicándose al sur del desierto de Atacama (Novoa y López, 2001). Esta región se encuentra en una transición entre el clima mediterráneo desértico y semi-desértico, con diferentes condiciones particulares, como el clima húmedo y nuboso en el litoral, y el estepárico cálido en el interior. El clima en la región se caracteriza por presentar veranos secos y cálidos e inviernos húmedos, condiciones que se deben a la variabilidad estacional de la posición del anticiclón del Pacífico Sur. Sin embargo, esta tendencia del clima depende en gran medida de la fase positiva o negativa de la oscilación del sur, también llamado fenómeno del Niño (ENOS) (Novoa y López, 2001).

En términos generales, la zona de la costa se caracteriza por presentar mucha humedad (85%) y mucha nubosidad, en las mañanas principalmente, con temperaturas muy moderadas, donde la temperatura media anual es de 14,7°C (La Serena), con una oscilación térmica que no supera los 6°C (Uribe *et al.*, 2012). La zona interior, en tanto, se caracteriza por ausencia de nubosidad. Aquí, la temperatura y la oscilación térmica diarias aumentan con respecto a la costa, mientras que las precipitaciones disminuyen, salvo en la zona de la Cordillera de los Andes, donde vuelven a aumentar. Las precipitaciones en la región se concentran fundamentalmente en los meses de invierno (Mayo a Agosto) (Uribe *et al.*, 2012).

Las precipitaciones a principios del siglo pasado eran del orden de los 170 mm al año, versus los 80 mm que se observaron hacia finales de siglo XX. Esta situación hace patente el efecto del cambio climático en la zona, factor a considerar al momento de evaluar medidas de protección de la biodiversidad (Novoa y López, 2001).

Suelos

Respecto de los suelos de la región, se ha hecho una clasificación desde un punto de vista general de los tipos de suelos presentes en la zona, respondiendo a las características del clima y a la geología. Esta caracterización establece que los suelos que se encuentran en el secano presentan muy poco grado de desarrollo, y la excepción la constituyen los suelos del fondo del valle, provistos de agua (Cepeda *et al.*, 2008). Las características de las rocas, dada la relativa homogeneidad y composición química, desempeñan un rol importante en las propiedades de los suelos (Oyarzún *et al.*, 2003). En la zona litoral, se desarrollan suelos aluviales, sobre terrazas marinas y fondos de valles fluviales, los cuales han evolucionado a partir de sedimentos marinos y continentales. En cuanto a los suelos de los valles, predominan los suelos provenientes de los interfluvios montañosos, transportados por cauces naturales, por lo que son predominantemente aluviales de evolución variable. Por otra parte, en los suelos ubicados en el piedemonte cordillerano y de alta montaña, predominan los Aridisoles y los Entisoles, tipos de suelos que poseen escaso desarrollo y

están generalmente desprovistos de vegetación; estos últimos son frecuentes en las fuertes pendientes de los cerros escarpados (Rovira, 1984; citado por Cepeda *et al.*, 2008).

Relativo a los suelos de las zonas interiores, el conocimiento de éstos es muy limitado, ya que, como se ya se ha señalado, la mayor parte de los estudios edáficos se han efectuado en los valles transversales, donde se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola (Luzio *et al.*, 2010). Los suelos que se observan en las serranías interiores pueden separarse en dos categorías dominantes: los suelos de origen aluvial y los de origen coluvial. El régimen de humedad de los suelos continúa siendo arídico y el régimen de temperatura térmico, debido a la escasa influencia marina. Aquí, los suelos que ocupan posición de abanicos aluviales o terrazas recientes son los que tienen menor desarrollo. Estos suelos se encuentran en diferentes condiciones de pendiente, por lo que los procesos de erosión hídrica son de distinta magnitud, llegando a ser severa; así, pese a presentar un escaso desarrollo de perfil sobre un sustrato de gravas y arena, presentan aptitudes muy diferentes por las diferentes formas de la topografía (Luzio *et al.*, 2010).

En cuanto a los suelos de los valles, si bien estos pueden presentar diferencias en sus características geomorfológicas y edáficas, se pueden reconocer patrones comunes que se repiten entre ellos. De esta forma, se pueden reconocer dos grandes clases de suelos, asociados a las formaciones donde se encuentran: los desarrollados a partir de sedimentos aluviales, por lo general en posición de terrazas de ríos, y los suelos de origen coluvial, asociados a los conos de deyección o coluvios que se proyectan desde las laderas de los valles hacia las posiciones más bajas. Entre estas dos condiciones se encontrarán variaciones, combinaciones y superposiciones entre ellas (Luzio *et al.*, 2010).

La zona litoral de la IV Región presenta dos clases de formaciones geomorfológicas, las cuales son las terrazas marinas y los cerros del batolito costero. Los suelos que se desarrollan en ambas formaciones presentan diferencias en su posición topográfica, en su desarrollo pedogénico y las propiedades morfológicas del perfil. Se ha asumido que toda la costa de esta región corresponde a un litoral de emergencia, razón por la cual el perfil aparece en su mayor proporción muy uniforme y parejo (Luzio *et al.*, 2010).

En cuanto a los suelos en posición de lomajes y cerros de la cordillera de la costa, estos se encuentran dentro de una formación relativamente homogénea, constituida esencialmente por rocas ígneas graníticas o asociadas al granito. Aquí, los suelos se diferencian por posición, grado de pendiente, grado de diferenciación de horizontes, profundidad de perfil, intensidad de erosión, y pedregosidad en superficie y en el perfil. En esta unidad se han descrito mayoritariamente suelos delgados con escaso desarrollo, con una profundidad no mayor a 50 cm sobre roca con distintos grados de meteorización o sobre fragmentos de roca gruesos, ubicados en laderas de cerros, con pedregosidad en superficie y principalmente con frecuentes afloramientos rocosos, ocupando las posiciones altas del relieve (Luzio *et al.*, 2010).

Modelo de clasificación experto de decisión

Los modelos dirigidos a determinar las características del perfil de suelos han sido diseñados de manera de determinar la redistribución vertical dentro del perfil (Salvador-Blanes *et al.*, 2007; Finke y Hutson, 2008). Este enfoque en el diseño de los modelos proviene de la pedología, por lo que opera a una escala del pedón (Vanwalleghem *et al.*, 2013), unidad básica tridimensional del suelo que comprende toda la profundidad del suelo, desde la superficie hasta el límite con el material rocoso. Algunos modelos, en este sentido, se plantean de tal forma que logran considerar procesos físicos, químicos y biológicos complejos (Finke y Hutson, 2008), pero estos fallan al no considerar la distribución espacial de puntos individuales y la conexión entre ellos (Vanwalleghem *et al.*, 2013).

Una respuesta a la necesidad de considerar la especialización de la información de suelos, la constituye el Mapeo Predictivo de Suelos (MPS). Este se basa en el desarrollo de un modelo numérico o estadístico, que establece una relación entre variables medio ambientales y propiedades del suelo, que posteriormente se aplicarán a una base de datos geográfica para lograr un mapa predictivo (Franklin, 1995; citado en Scull *et al.*, 2003). Los principales objetivos del MPS son tres, a saber (Scull *et al.*, 2003): 1) explotar la relación entre las variables medio ambientales y la propiedades del suelo en orden a promover una mejor recolección de datos de suelo; 2) producir y presentar información que logre representar mejor la continuidad del suelo en el paisaje; e 3) incorporar en forma explícita el conocimiento experto en el diseño del modelo.

La implementación de un MPS, cuando se tiene como base teórica los factores de estado definidos por Jenny (1941), tiene la limitación de que la ecuación matemática derivada de la teoría es prácticamente irresoluble (Hugget, 1975). Respecto a esto último, si bien es necesario definir explícitamente los modelos para la predicción espacial de suelos, no es necesario hacerlo en forma cuantitativa (Hewitt, 1993; citado por McBratney *et al.*, 2003), ni tampoco completamente automatizada. Desde este punto de vista, los mapeos de suelos generados mediante un MPS pueden ser representaciones del conocimiento de los especialistas de suelos (McBratney *et al.*, 2003). A este tipo de técnica de MPS se le denomina “expert knowledge-based systems” (Sistemas expertos basados en el conocimiento), o modelo experto de decisión, que corresponde a una vía de recolección e ingeniería del conocimiento (Dale *et al.*, 1989; citado por McBratney *et al.*, 2003).

Los modelos basados en conocimiento experto consisten en un procedimiento de interpretación de los modelos mentales de los expertos, mediante la captura o adquisición de conocimiento. Para este fin, es necesario diseñar un marco o sistema que represente la base de datos de información y la forma en que aquellos modelos mentales generan soluciones a los problemas abordados (Bui, 2004), para luego programarlos y refinarlos, generando con ello un modelo que pueda ser sistematizado digitalmente.

Los modelos basados en conocimiento experto requieren integrar eficientemente el conocimiento existente y permitir un grado de inferencia suficiente para poder dar respuesta a los problemas o preguntas que se hayan planteado responder. De esta manera, una vez definido el marco en base al cual se va a realizar la representación de la realidad, empieza la programación del conocimiento, punto a partir del cual el conocimiento humano es transformado a una base de datos a partir de la cual se puede diseñar un modelo experto.

De esta forma, el principal propósito de los “expert systems” es el de aprovechar el volumen de conocimiento acumulado en terreno por el experto, mediante la integración de dicho conocimiento dentro de un modelo predictivo (McCracken y Cate, 1986). En estos modelos, las variables dependientes son las categorías de suelo o las unidades de suelo. Esta aparente desventaja respecto a modelos estadísticos o netamente matemáticos, que generan información en forma continua, permite que resulte más sencillo integrar la información generada al estudio de suelos tradicional (Scull *et al.*, 2003).

Un modelo experto de decisión puede ser implementado mediante una clasificación digital, la cual considera la generación de una cartografía mediante un inventario de las categorías que sean objeto de estudio. De esta forma, un método de clasificación digital debe procurar tener las siguientes características (Cihlar *et al.*, 1998): fiabilidad, replicable (dadas las mismas variables de entrada), robusto (poco sensible a los cambios en las variables de entrada), exhaustivo (que cubra toda la superficie de la imagen) y objetivo (sin mayor intervención del intérprete). Esta última característica tiene relación con evitar un sesgo en la interpretación al ser intervenida por factores externos a la metodología de clasificación; sin embargo, el criterio dado por un experto en la materia puede ser de utilidad para afinar detalles en el planteamiento del método (Chuvieco, 2008).

Un aspecto importante a destacar es que el método sea replicable, puesto que uno de los objetivos del presente trabajo es generar una metodología que pueda ser aplicada en otras zonas del país. Ahora bien, Robinove (1981) postula que el principio de clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta aplicable a cualquier imagen, sino más bien una caracterización relativa válida para una determinada imagen y un territorio concreto. Es necesario entonces definir un balance entre el concepto de reproducibilidad y el de caracterización relativa, definiendo bien las condiciones en que este estudio sea desarrollado, de manera de establecer directrices acerca de las áreas donde pueda ser replicable el método a generar.

Dijkerman (1974) define los distintos propósitos que debe tener un mapa de suelos:

- 1) Observacional, referido a la toma de muestras de una población de cuerpos de suelo y el estudio de sus comportamientos.
- 2) Experimental, referido al estudio realizado bajo condiciones controladas.
- 3) Descriptivo, relativo a la caracterización del sistema que está bajo estudio.
- 4) Explicativo, el cual tiene que ver con posibilitar las relaciones y comportamiento de los sistemas de suelos.

- 5) Predictivo, usado para establecer las relaciones y el comportamiento en los sistemas de suelos.
- 6) Escalar, referido a la representación de la realidad a una magnitud de utilidad y de efectividad para el estudio a realizar.
- 7) Idealizado, referido a la simplificación, a un nivel comprensible por el intérprete, de la realidad.
- 8) Análogo, relativo al traspaso de la información a un nivel digital.

En base estos propósitos, se debe idear y diseñar el modelo de caracterización de suelos basado en conocimiento experto. Considerando que dentro de los propósitos propuestos por Dijkerman (1974), se establece que los mapas de suelos son representaciones descriptivas, escalares e idealizadas, se puede establecer que estos últimos son representaciones del conocimiento acerca de objetos presentes en el espacio, más que representaciones de objetos en el espacio, lo que implica que los mapas de suelos generalmente resulten de difícil comprensión por el intérprete que no esté versado en el conocimiento experto relativo a la ciencia del suelo. Por esta razón, resulta importante que el mapa y modelo a generar sean de fácil interpretación, y que no sean meras representaciones del conocimiento estructurado de los edafólogos, lo que se logra al armonizar la información disponible con el objetivo a lograr, que es generar una herramienta útil para predecir tipos de suelos a distancia.

En el ámbito de los trabajos realizados utilizando modelos expertos de decisión, existen varias experiencias al respecto. Bui (2004) y Wielemaker *et al.* (2001) han sugerido una serie de metodologías para diseñar estos modelos, basados en la estructuración de objetos en el paisaje dentro de un esquema jerárquico, seguido de una serie de reglas basadas en la inferencia y formalización de la información disponible (McBratney *et al.*, 2003). Las principales aproximaciones que se han realizado para la obtención de un modelo experto de clasificación dentro del ámbito del estudio de suelos las han realizado Skidmore *et al.* (1991) y Cook *et al.* (1996) con el modelo Expectator, y Castro *et al.* (2000) con el modelo MORSE.

Los modelos anteriormente señalados, refiriéndose especialmente el modelo Expectator, se basan en el uso del modelo bayesiano (Cohen, 1985), que da como resultados probabilidades de pertenencia a los tipos de clasificaciones definidas (probabilidades de distribución). De esta manera, las distribuciones iniciales asignadas a cada factor a integrar en el modelo pueden ser asignadas mediante muestreos en terreno o bien a partir del conocimiento que pueda proveer un experto (Corner *et al.*, 2002). Por otra parte, el modelo incluye la determinación de la “pureza” del resultado, consecuencia de comparar el resultado de la clasificación supervisada realizada y la realidad en terreno, que puede establecerse mediante la opinión de un experto (Corner *et al.*, 2002).

Clasificación de suelos según Capacidad de Uso

La clasificación según Capacidades de Uso de suelo es un sistema de grupos interpretativos desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (“United States Department of Agriculture”, USDA), que se basa en agrupar suelos en orden a comportamientos similares para prácticas específicas (USDA, 2014).

La clasificación según capacidades de uso, como se señala en el “Agriculture Handbook” N°210 (Klingebiel y Montgomery, 1961), nace con el propósito de generar grupos interpretativos para propósitos agrícolas. De esta forma, como todos los grupos interpretativos, la clasificación según capacidad de uso parte con un mapeo de unidades de suelo individual, que es la base de todo el sistema de clasificación. En este sistema, los suelos arables se encuentran agrupados de acuerdo a sus potenciales y limitaciones para sostener una producción de cultivos que no requiera un acondicionamiento especial del terreno o tratamientos especiales. En cuanto a los suelos no arables, estos son agrupados según sus potenciales y limitaciones para sostener vegetación en forma permanente, de acuerdo a los riesgos asociados a un mal manejo (Klingebiel y Montgomery, 1961).

La clasificación según capacidad de uso del terreno (“land capability classification”) adquirió un carácter de importancia en el Congreso de políticas agrarias de Estados Unidos el año 1985, donde se evaluó establecer previsiones respecto de las consecuencias de largo alcance de la conservación (Helms, 1992). En este contexto, una de las preocupaciones a este respecto manifestadas por el USDA tuvo relación con la erosión asociada con los programas agrícolas que fomentaban el uso de tierras erosionables para cultivos. De esta forma, se empezó a considerar el fomento del cambio de uso de tierras altamente erosionables desde el cultivo a otros usos productivos. A partir de estas consideraciones, se hizo uso de la clasificación de terreno según capacidad de uso para identificar las áreas altamente erosionables. Así, este sistema de clasificación ha sido utilizado durante cuarenta años como herramienta de planificación en orden a minimizar la erosión del suelo (Helms, 1992).

La capacidad de uso de terreno, de ahora en adelante Capacidad de uso de suelo, en orden a los objetivos del presente trabajo, corresponde a un sistema que agrupa a los suelos en base a su capacidad de producir cultivos y praderas sin generar deterioro por una período largo de tiempo (Helms, 1992). Este sistema de clasificación se basa el asignar a cada unidad de suelo una categoría de capacidad de uso entre I y VIII, donde las clases V a VII consideran subclases que describen limitaciones o peligros para propósitos agrícolas (USDA, 2014).

La clasificación por capacidades se basa en tres categorías mayores que agrupan los distintos tipos de suelo: Unidad de Capacidad, subclase de Unidad de Capacidad y Clase de Capacidad. La primera categoría, la Unidad de Capacidad, es la agrupación de los suelos que presentan las mismas respuestas a los sistemas de manejo de cultivos comunes y de praderas, los que requieren de los mismos sistemas de manejo para estos cultivos. La

segunda categoría, las subclases de Unidad de Capacidad, se basa en agrupar suelos con similares limitaciones y riesgos, que pueden ser de 4 tipos: riesgo de erosión, riesgo de drenaje, riesgo de limitación en la zona de enraizamiento y riesgo climático (Klingebiel y Montgomery, 1961).

La tercera categoría, la Clase de Capacidad, clasifica a los suelos en ocho categorías. Este sistema de clasificación categoriza las limitaciones de suelo en forma progresivamente mayor desde la categoría I hasta la categoría VIII. Los suelos de las primeras cuatro categorías, bajo buenas prácticas de manejo, son capaces de producir especies de plantas ya adaptadas, tales como árboles frutales y cultivos agrícolas. Por otra parte, los suelos de las categorías V, VI y VII son adecuados para especies de plantas nativas adaptadas a la zona de estudio, orientado a la producción de praderas y especies forestales. Los suelos de la clase VIII, en tanto, no permiten sustentar actividades productivas (Klingebiel y Montgomery, 1961).

Respecto de los niveles de clasificación, la Unidad de Capacidad, que es la primera categoría descrita para determinación de capacidad de los suelos, puede ser utilizada y definida según lo dicte la clasificación propia establecida por cada institución competente. En el caso de Estados Unidos, cada estado federado tiene un sistema de clasificación independiente, en unidades de capacidad que pueden dividirse en un rango entre 1 y 99 categorías distintas (USDA, 2014). Esta variabilidad en el criterio de clasificación según unidad de capacidad, implica que a este nivel sea muy relativa la utilización de este tipo de clasificación, y por tanto poco estandarizable. Por esta razón no se utilizó este criterio para la clasificación de suelos en el presente trabajo.

Las Capacidades de Uso, en tanto, corresponden a la categoría más amplia desarrollada por el USDA para la clasificación de capacidades de suelos. Los códigos de las clases I (1), II (2), III (3), IV (4), V (5), VI (6), VII (7) y VIII (8) son usados para representar las clases de capacidades para suelos irrigados y no irrigados (USDA, 2014).

Las definiciones, a grandes rasgos, de las categorías de capacidad de uso de suelos, son las siguientes (Klingebiel y Montgomery, 1961):

- Clase I (1): suelos que tienen limitaciones leves que restrinjan su uso;
- Clase II (2): suelos con limitaciones moderadas, que reducen la capacidad de elección de cultivos para ser establecidos en estas unidades, o bien que requieren moderadas prácticas de conservación para su utilización agrícola;
- Clase III (3): suelos con limitaciones severas, que reducen la capacidad de elección de cultivos para ser establecidos en estas unidades y/o requieren medidas de conservación especiales;
- Clase IV (4): suelos que tienen limitaciones muy severas, que reducen la capacidad de elección de cultivos para ser establecidos en estas unidades y/o requieren un manejo muy cuidadoso de suelos;

- Clase V (5): suelos que tienen poca o ningún riesgo de ser erosionados, pero que tienen otras limitaciones, no modificables en términos prácticos, los que limitan su uso a praderas, pastizales, plantaciones forestales, o para su conservación;
- Clase VI (6): suelos con severas limitaciones que los hace inadecuados para su cultivo, y que ven restringido su uso fundamentalmente a pasturas, cultivos forestales o para su conservación;
- Clase VII (7): suelos con limitaciones muy severas que los hace inadecuados para su cultivo, y que ven restringido su uso a pasturas, cultivos forestales o para su conservación;
- Clase VIII (8): suelos y áreas misceláneas que tienen limitaciones que los excluyen para su uso para producción comercial de plantas, y que ven limitado su uso a recreación, para su conservación, suministro de agua o propósitos estéticos.

Estas definiciones, meramente de carácter cualitativo, pueden sistematizarse y llevarse a parámetros en su mayoría cuantificables, que pueden servir como criterios objetivos para la clasificación de suelos según su capacidad de uso. En este sentido, el USDA ha generado una esquematización de la totalidad de las propiedades y cualidades de suelo que pueden ser utilizadas para asignar Capacidades de Uso a las unidades cartográficas de suelo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades y cualidades utilizadas para asignación de clases de capacidad.

Propiedades de los suelos	Clase de Capacidad de Uso de suelo							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Mínima profundidad a estrata lítica o paralítica (cm)	100	50	50	25	100	50	25	25
Clase textural superficie	Fa, F, FL, FAa, FA, FAL, aA,a	aA, a, AL, Aa, A, O	A	a, aA	Fa, F, FL, FAa, FA, FAL, aA,a	aA, a, AL, Aa, A, O	A	Clase no determinada
Régimen de humedad	Udic, Ustic	Ustic	Aridic, Ustic	Aridic, Ustic	Clase no determinada	Ustic, Aridic	Clase no determinada	Clase no determinada
Gradiente de pendiente (%)	<2	≥2 a <5	≥5 a <8	≥8 a <25	<2	≥8 a <25	≥25 a <50	Clase no determinada
Geoforma	Planos	Drenajes de media pendiente, valles poco profundos; Drenajes de zonas altas, nacientes de cauces; Valles en forma de U; Planos; Pendientes abiertas; Pendientes de altura, mesetas; Estribaciones locales, colinas en valles; Estribaciones de pendientes medias, pequeñas colinas en planos.	(mismo criterio Clase I)	Drenajes de media pendiente, valles poco profundos; Drenajes de zonas altas, nacientes de cauces; Valles en forma de U; Pendientes abiertas; Pendientes de altura, mesetas; Estribaciones locales, colinas en valles; Estribaciones de pendientes medias, pequeñas colinas en planos.	Planos	(mismo criterio Clase IV)	Cañones, arroyos en quebradas profundas; Cimas de montañas, estribaciones altas	Cimas de montañas, estribaciones altas

Fuente: USDA (2014)

En el Anexo 1 se encuentra la leyenda de las siglas de las texturas que se observan en el Cuadro 1.

El Cuadro 1 ha sido generado a partir de una serie de criterios sugeridos por el USDA (2014), donde se han conservado solo aquellos factores que pueden ser determinados a partir de la información con la que se dispondrá para la implementación del presente estudio, correspondiente a imágenes obtenidas mediante el satélite Landsat 7 ETM+ y el modelo de elevación digital generado mediante el sensor ASTER, cuyos detalles se detallarán más adelante.

La decisión de utilizar estas fuentes de información primarias se basaron en utilizar información de calidad, fácil acceso y gratuita, con objeto de procurar que el modelo sea fácilmente replicable (Cihlar *et al.*, 1998), de manera de que la obtención de la información no sea un obstáculo para la implementación del modelo propuesto, decisión que implicó contar con imágenes con una resolución espacial y espectral suficiente para una escala de trabajo regional, correspondiente a la propuesta para la ejecución del presente trabajo.

Respecto a la categoría Geoforma incluida en el Cuadro 1, esta se ha agregado a las propuestas originalmente por el USDA (2014), en base a las determinaciones de formas del paisaje que se realizaron en el presente estudio, como se detallará más adelante.

Para efectos de la clasificación según Capacidades de Uso de suelo, no se consideró la Clase V, ya que los suelos considerados dentro de esta clase, se caracterizan por tener limitaciones de drenaje, por ser planos a casi planos, o por encontrarse en depresiones sin cota suficiente para evacuar el exceso de agua, presentando generalmente un horizonte impermeable (Freres, 2001). Las condiciones antes descritas son escasas en la Región de Coquimbo, limitándose a situaciones de pequeñas unidades acotadas, fundamentalmente en la cordillera de Los Andes, correspondientes a vegas y humedales de altura, que apenas ocupan un área equivalente al 0,4% de la superficie regional (CONAF *et al.*, 2004). En base a lo anterior, la Clase V resulta de difícil identificación y reconocimiento a la escala de mapeo del presente trabajo, razón por la cual se determinó no incluirla en el modelo de clasificación a generar.

Como se puede observar en el Cuadro 1, la clasificación de suelos en base a Clases de Capacidad de Uso, requiere contar con información relacionada con los factores que logren describir las condiciones de desarrollo de un suelo y su contexto espacial, tales como los factores de formación definidos por Jenny (1941).

En este contexto, los factores de formación de suelos utilizados en el presente trabajo, para ser incluidos como variables dentro del modelo experto de decisión, son los siguientes:

- Naturaleza del material parental;
- Geoformas del paisaje (Relieve);
- Regímenes de humedad (Clima)

A continuación se detallará cada uno de estos factores, con objeto de definirlos y establecer su pertinencia para efectos de la implementación del modelo experto de decisión.

Naturaleza del material parental

El material parental se puede definir como el material, consolidado o no, a partir del cual comienza a desarrollarse un suelo. Este factor de formación de suelos es un elemento pasivo en la edafogénesis, sobre el que actúan otros factores que lo transforman, intervienen en su organización y hacen aumentar su grado de estructuración. Por lo anterior, representa el estado inicial del suelo (Birkeland, 1999).

El material parental requiere ser descrito de la forma más precisa que sea posible, indicando su origen y naturaleza. En este sentido existen, a grandes rasgos, dos grupos de material parental sobre los que se puede formar el suelo: materiales no consolidados (mayormente sedimentos) y materiales intemperizados, los cuales se encuentran sobre las rocas que les dieron origen.

Se pueden reconocer dos grandes grupos de materiales originarios (Fuentes, 2005): material *in situ* o autóctono, que corresponde al material que no ha sido transportado de su posición originaria inicial; y material transportado y depositado o alóctono, que es material no consolidado, que puede haber sido transportado por uno o más agentes transportadores, como lo son el agua (materiales aluviales, fluviales, lacustres o marinos), la gravedad (materiales coluviales), hielo (depósitos glaciares) y el viento (depósitos eólicos). Respecto al material alóctono, también puede presentarse por efecto de una erupción volcánica, con depósitos sobre la superficie asociados a este tipo de fenómenos (Birkeland, 1999).

El material parental influye sobre características del suelo, como por ejemplo color, mineralogía, textura, estructura, pH, entre otros. Esta influencia dependerá de los factores de formación de suelo y de las propiedades intrínsecas del material parental, que determinarán la susceptibilidad de la roca a meteorizarse. De esta forma, se pueden establecer relaciones, en términos generales, entre el tipo de material rocoso y las características del suelo que potencialmente pueda derivar de este (Fuentes, 2005). Porta *et al.* (2003) estableció una relación entre los tipos de suelos esperados a partir de algunos tipos de materiales parentales (Cuadro 2), a partir de observaciones en terreno.

Cuadro 2. Posibles características de suelo de acuerdo a tipos de rocas.

Nº Categoría	Tipo de roca	Características posibles del suelo
1	Granitoides	Tendencia arenosa Con régimen de humedad percolante: suelos ácidos
2	Lavas y cenizas basálticas	Tendencia arenosa Color rojo oscuro a pardo oscuro Elevado contenido de hierro Estación seca: arcillas esmectíticas Régimen percolante: caolinita Régimen perhúmedo: alófana
3	Esquistos	Tendencia arcillosa (illita, vermiculita) Estación seca: esmectitas
4	Litoarenitas	Textura gruesa, arenosa Muy permeable (en general) Régimen percolante: suelos ácidos, pobres en bases
5	Arcosas	Ricos en arcillas (hidrólisis de feldespatos) Posible translocación de arcillas
6	Cuarciarenitas	Suelos arenosos con cuarzo Escasa posibilidad de evolución Climas cálidos y húmedos: puede desarrollar horizonte A profundo
7	Calizas	Sobre roca dura: suelos muy pedregosos, poco profundos Régimen húmedo: suelos ricos en arcillas
8	Lutitas	Argilitas: tendencia arcillosa Limolitas: tendencia limosa
9	Con Carbonato cálcico (e.g., margas)	Clima seco: pH básico Clima húmedo: se frena acidez y desarrollo de suelo

Fuente: Porta et al. (2003)

La información de base a partir de la cual se buscó determinar los tipos de material parental para el estudio se obtuvo del Mapa Geológico de Chile, el cual corresponde a una compilación de trabajos realizados en el país relativos a cartografía geológica, realizada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2003). Este mapa, escala 1:1.000.000 en su última versión, fue elaborado por esta institución el año 2002 en formato impreso y digital, incluyendo las coberturas cartográficas más relevantes para el país.

En el Apéndice 1 se especifican las unidades geológicas descritas para la Región de Coquimbo, en base a la información recopilada del Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003).

Los suelos varían de un lugar a otro en el paisaje, aunque suelos desarrollados en distintos lugares y ubicación en el paisaje pueden resultar ser semejantes (Porta *et al.*, 2003). En este sentido, se diferencian dos tipos de variaciones: variación sistemática, consistente en cambios graduales o pronunciados en las propiedades del suelo, que puede ser explicada y predicha a partir de los factores que intervienen en la formación de suelo; y variación al azar, que es la variación de las propiedades del suelo que no puede relacionarse con los factores formadores, donde la variabilidad de una unidad cartográfica detallada no es capaz de ser explicada (Mausbach y Wilding, 1991).

En el presente trabajo se consideró una condición de variación sistemática, a través de la búsqueda de patrones en el espacio que permitan relacionar las geoformas del paisaje con el material geológico, y subsecuentemente con el material parental y el clima de cada zona. Este proceso, por tratarse de un estudio a escala regional, permitió generalizar aquellas variaciones al azar que puedan existir en el espacio, cuales excepciones que confirmen la regla. Ciertamente las variaciones al azar se pueden explicar mediante estimaciones basadas en métodos geoestadísticos de una complejidad mayor al modelo propuesto en el presente trabajo, pero que escapan de la finalidad práctica de agrupar y caracterizar condiciones semejantes en unidades discretas espacialmente.

La naturaleza del material parental se definió a partir del uso de percepción remota para la interpretación de imágenes satelitales correspondientes a la Región de Coquimbo, delimitada por sus límites políticos. Las imágenes utilizadas correspondieron a las obtenidas mediante el satélite Landsat 7, formalmente conocido como “Earth Resource and Technology Satellite” (ERTS), por medio del scanner ETM+ (“Enhanced Thematic Mapper”) (Lau, 2004).

Estas imágenes se obtuvieron con el objeto de afinar el mapa geológico de Chile generado por el SERNAGEOMIM (2003). Este corresponde a una recopilación de estudios geológicos realizados a distintas escalas, cuya escala final es 1:1.000.000, resultado de una recopilación de trabajos que cuyas unidades geológicas presentan distintos niveles de detalle para su delimitación espacial y tamaños muy variables dependiendo del estudio. En vista de estas consideraciones, se determinó aumentar el nivel de detalle del Mapa Geológico de Chile, de manera de aproximarse a la escala de trabajo que se utilizó en este trabajo (1:250.000), con fin de hacerlo más compatible con las otras fuentes de información utilizadas, aprovechando el potencial del mapa geológico de brindar mayor de nivel de detalle al haber sido generado con trabajos a escala menores al resultado final informado (SERNAGEOMIM, 2003).

La serie de satélites Landsat han generado el registro continuo de observaciones a partir de satélites en forma más larga de que se tenga registro. Por esta razón, estas imágenes son una fuente de información para el monitoreo global de gran valor, tanto para fines de detectar cambios por efecto del cambio climático, como para la toma de decisiones (Wulder *et al.*, 2008; citado en Chander *et al.*, 2009).

Las imágenes Landsat utilizadas en el presente trabajo, se descargaron a partir del sitio web <http://earthexplorer.usgs.gov>, cuyo detalle se puede observar en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Datos técnicos imágenes utilizadas.

Path/Row Escena	Satélite	Sensor	Fecha	Resolución espacial (m)	Fuente
1/80			01/12/1999		
1/81			26/01/2003		
1/82	Lansat 7	ETM+	02/03/2000	30	Sitio web USGS ¹
233/80			02/12/2000		
233/81			29/01/2001		
233/82			11/01/2000		

1) <http://earthexplorer.usgs.gov>.

Como se puede apreciar en el Cuadro 4, cada una de las escenas capturadas por el satélite Landsat 7 ETM+ consta de 8 bandas espectrales, de las cuales no se utilizó la banda 6, que corresponde al rango infrarrojo termal, ni la banda 8, que corresponde a la banda pancromática, ya que no son de interés para el presente trabajo.

Cuadro 4. Especificaciones imágenes Landsat 7 ETM+ utilizadas.

Modo espectral	Resolución espacial (m)	Banda	Resolución espectral (μ m)	Resolución radiométrica (bits)	Resolución temporal (días)
Multiespectral	30	1	0,45-0,52	8	16
		2	0,53-0,61		
		3	0,63-0,69		
		4	0,78-0,90		
		5	1,55-1,75		
		7	2,09-2,35		

Las bandas de cada escena fueron proyectadas en base al Esferoide WGS84 y Datum WGS84, utilizando el sistema de proyección UTM, huso 19 Sur, que es el correspondiente en el sistema UTM para la Región de Coquimbo.

Las imágenes a utilizar fueron obtenidas para fechas anteriores al del 31 de Mayo de 2003, que es cuando se generó una falla en el sistema del satélite Landsat 7 ETM+ denominado el Scan Line Corrector (SLC) (Menke, 2007), razón por la cual las imágenes seleccionadas para este estudio fueron generadas en fechas anteriores a este episodio. El SLC tiene por finalidad compensar el movimiento hacia delante del satélite durante la adquisición de las imágenes, por lo que al fallar genera franjas de datos inválidos, mejor conocidos como "gaps". De esta manera, con el SLC fuera de funcionamiento, el área escaneada por el sensor del satélite delinea un patrón en zig-zag, lo que produce que parte de los datos registrados estén duplicados y que existan regiones geográficas no detectadas, que se aprecian como franjas negras con un valor digital igual a cero en todas las bandas que registra el satélite. De esta manera, al usar imágenes previas a la falla del SLC se evita lidiar con la corrección de las imágenes, cada una de las cuales a priori tienen una pérdida de 22% de la información (Menke, 2007). Respecto de la naturaleza de los parámetros a medir a través de las imágenes satelitales, específicamente las características del material

parental, estos no varían significativamente en períodos cortos de tiempo a grandes escalas, ya que se rigen por procesos de índole geológico y pedológico. Por esta razón, la falla del SLC, que obliga a usar imágenes previas a aquel evento, no incide significativamente en la objetividad de las mediciones a realizar, si se toma en cuenta que corresponden a imágenes obtenidas hace 12 años.

Una vez obtenidas las imágenes, estas tuvieron que ser corregidas con objeto de eliminar los errores derivados del efecto producido por la atmósfera y por el sombreado (corrección atmosférica y corrección lumínica, respectivamente). Posteriormente, se realizó la calibración propia de las imágenes Landsat que tiene como objetivo transformar los valores de los distintos píxeles desde niveles digitales (ND) a unidades de radianza (expresada en $Wm^{-2} r^{-1} \mu m^{-1}$), para posteriormente calcular la reflectividad aparente (expresada como una proporción, adimensional).

Para el procesamiento de las imágenes, se utilizó el software de GIS Idrisi Selva, a través del cual se llevaron a cabo todos los pasos del procedimiento de corrección de imágenes. El procedimiento de corrección se detalla en el Anexo 2.

Una vez obtenidas las bandas corregidas para cada escena, estas se unieron en una sola imagen utilizando el software ERDAS 10, mediante el comando “MOSAIC”, a través del cual se unieron las 6 bandas de las 6 escenas que abarcan la Región de Coquimbo, para su posterior procesamiento.

Posterior a la obtención y la aplicación de las correspondientes correcciones de las imágenes satelitales, se procedió a su clasificación con objeto de detectar los tipos de materiales que dieron origen a los suelos de la zona de estudio. Esto tiene por finalidad permitir determinar las Clases texturales de los suelos, en su calidad de factor requerido para la clasificación de suelos según Clase de Capacidad de Uso (Cuadro 1), como se detallará en la sección resultados.

Geoformas del paisaje

El concepto de geoforma procede de la geomorfometría, que corresponde a la ciencia que describe y analiza cuantitativamente las características geométricas y topológicas del paisaje. De esta forma, la geomorfometría se vale del reconocimiento y la cuantificación de las formas del paisaje o geoformas (Rasemann *et al.*, 2004). Es así que esta disciplina deriva en el análisis y descripción de las unidades de relieve (“landform units”).

La geoforma corresponde a un concepto que desde la geomorfología tiene más de una funcionalidad. En primer lugar, en términos de los procesos de formación en el presente, la geoforma actúa como una condición límite del relieve que puede ser cambiada en forma dinámica por procesos activos. En segundo lugar, en términos de los procesos de formación que afectaron en el pasado, la geoforma se constituye como un registro del pasado del

relieve, cual paleoforma. El estudio de las geoformas permite entonces inferir los parámetros de procesos dinámicos recientes y también es útil para determinar procesos de formación a escalas largas de tiempo. Por lo anterior, la geomorfometría complementa descripción y explicación de procesos. Actualmente, los modelos de elevación digital (“Digital Elevation Models”, DEMs) permiten el reconocimiento y análisis de estas unidades del paisaje en regiones extensas de la superficie terrestre (Rasemann *et al.*, 2004).

Las geoformas han sido organizadas según una jerarquía de conjuntos, razón por la que ha sido necesario establecer una formalización de estas a distintos niveles de escala. Por esta razón, al utilizar métodos y parámetros computacionales para este fin, sus desempeños dependerán de la escala espacial de trabajo. La dependencia de la escala por parte de las geoformas y de las propiedades geomorfológicas implica que sean organizadas según una jerarquía espacial (Brunsdén, 1996; citado en Rasemann *et al.*, 2004). Por esta razón, un objetivo fundamental asociado a la determinación de geoformas es la subdivisión del continuo espacial, en unidades que estén asociadas a los procesos o fenómenos específicos que estén bajo estudio. De esta forma, las geoformas pueden ser descritas mediante varios tipos de escalas y atributos, tales como curvatura, gradiente o exposición (Rasemann *et al.*, 2004), análisis que se puede realizar utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIGs), que ofrecen herramientas para aplicar algoritmos en el análisis geomorfométrico (Dikau, 1993; citado en Rasemann *et al.*, 2004).

Un método para la determinación de las geoformas del paisaje basado en el uso de SIG, a partir del cual se pueden inferir a las formas de depósito o acumulación de material en el paisaje, es el “Topographic Position Index” (TPI), método desarrollado por Weiss (2001). Este es un índice que permite trabajar a diferentes escalas, que permite clasificar el paisaje según la posición de la pendiente (crestas, fondos de valles, etc.) y categorías de formaciones del paisaje (cañones estrechos escarpados, valles suaves, pendientes abiertas, etc.) (Jenness, 2006).

Los algoritmos que usa el TPI son claros en su planteamiento y de fácil entendimiento. A partir de un DEM, este índice se basa en la clasificación del paisaje, calculando la diferencia entre la elevación de cada celda o pixel y la elevación promedio del entorno que rodea a cada una. Los valores positivos indican que las celdas del entorno son más bajas que el punto evaluado, y los valores negativos indican que este último se encuentra por debajo de las celdas de su entorno (Jenness, 2006).

El grado en que las celdas vecinas se encuentran sobre o por debajo de la celda evaluada, se utiliza para clasificar su posición según su pendiente. Si los valores son significativamente altos, puede indicar que se trate de la parte superior de una cresta montañosa; por el contrario, si estos valores son muy negativos, esto puede indicar la presencia del fondo de un valle. Los valores de TPI cercanos a cero pueden indicar la presencia de un área plana o de pendientes medias, en cuyo caso la pendiente de la celda puede ser utilizada para distinguir un caso de otro (Jenness, 2006).

La capacidad del TPI para reconocer geformas en el espacio depende en gran medida de la escala de trabajo a la cual opere para generar la clasificación (Jenness, 2006). Por esta razón, y dependiendo del fenómeno que se quiera analizar, es necesario definir cuidadosamente la escala a la cual se aplicará este índice. La escala de trabajo está determinada por la magnitud del área o vecindad (en inglés “neighborhood”), utilizada en los alrededores del punto a evaluar. Los valores que indique el TPI reflejan las diferencias entre la elevación en un pixel en particular y la elevación promedio de los pixeles que la rodean. De esta forma, el área o “neighborhood” define las celdas que serán consideradas para efectos de establecer las formas del paisaje en torno a cada pixel (Jenness, 2006).

La forma de las áreas en torno a las celdas puede ser de distintas formas. Weiss (2001) propone ejemplos donde utiliza una “neighborhood” en forma anular (anillo en torno a cada celda evaluada), donde solo se evalúan las celdas que se encuentra a cierta distancia de la celda central. Otros autores utilizan “neighborhood” con forma rectangular, pero en la mayoría de los casos la utilización de áreas en forma circular resulta ser la opción más razonable. En el presente trabajo se utilizó esta última opción.

En la sección resultados se detalla el método propuestos por Weiss (2001) y su aplicación para la determinación de geformas del paisaje, donde se definió la escala de trabajo en la que va a operar el TPI.

Regímenes de humedad

Las diferentes clasificaciones de suelo han considerado al factor clima en su diseño, ya que este factor influye sobre los procesos de formación, así como en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas (Van Wambeke y Luzio, 1982). Es el caso, por ejemplo, del sistema de clasificación de suelos rusa, como criterio básico para diferenciar tipos de suelos (Rozob e Inanova, 1967).

En el caso de la clasificación realizada por el “Soil Survey Staff” (2010), el clima se considera como uno de los factores iniciales para clasificación de suelos, así como también en algunos niveles inferiores en el sistema de clasificación. El factor clima es considerado para determinar el “régimen de humedad del suelo”, que corresponde a un criterio que considera la presencia o ausencia ya sea de un manto freático o al agua retenida a una tensión de 1500 kPa (valor absoluto) o menor en el suelo o en horizontes específicos por períodos del año (Soil Survey Staff, 2010).

Este sistema considera 5 regímenes de humedad y 10 regímenes de temperatura del suelo, los que se aplican a diferentes niveles de la taxonomía de suelos, desde Órdenes hasta Familias. De esta forma, ambos parámetros son de utilidad para definir los límites de las diferentes taxas (Van Wambeke y Luzio, 1982). Sin embargo, la determinación de los regímenes de humedad requiere de largas y complicadas observaciones de campo, las que consideran una serie de dificultades técnicas para ser determinadas.

El régimen de humedad está condicionado según la presencia o ausencia de agua disponible para las plantas a una profundidad determinada, que corresponde a la sección de control de humedad. De esta forma, junto con el régimen de temperatura del suelo, se puede establecer la disponibilidad de agua para la vegetación a lo largo del tiempo y las condiciones térmicas en que se hallarán sus raíces; ambos factores, por tanto, permitirán caracterizar el clima del suelo (Jarauta, 1989).

Los suelos de zonas áridas y semiáridas no necesariamente se encuentran secos, como se podría inferir de las bajas precipitaciones y las altas temperaturas propias de estos tipos de suelos. Estos pueden encontrarse secos, húmedos o saturados, dependiendo de su situación en el paisaje, ya que pueden recibir aportes de agua de fuentes distintas a las precipitaciones (Jarauta, 1989). De esta forma, suelos ubicados en zonas de altas pendientes pueden perder mucho del aporte de las escasas precipitaciones por efecto de la escorrentía, o bien suelos en valles pueden tener en profundidad una gran reserva de agua.

Sistema de clasificación propuesto por el Soil Survey Staff (USDA). La determinación de la sección de control de humedad tiene por finalidad la estimación de los regímenes de humedad de los suelos a partir de datos climáticos (Soil Survey Staff, 2010). Esta sección está definida por dos límites: un límite superior de la sección de control, que es la profundidad a la cual el suelo seco (tensión menor a 1500 kPa, no seco al aire) ha sido humedecido por 2,5 cm de agua por 24 horas; y un límite inferior de la sección de control, profundidad a la cual un suelo seco (tensión menor a 1500) será humedecido por 7,5 cm de agua en 48 horas (Soil Survey Staff, 2010).

En cuanto a las clases de Regímenes de humedad del suelo, están definidos en términos del nivel del manto freático y por la presencia o ausencia de agua retenida a una tensión menor de 1500 kPa en la sección de control de humedad. A partir de esta información, se definen 5 regímenes de humedad (Soil Survey Staff, 2010): Aquic, Udic, Ustic, Xeric, Aridic-Torric.

Para establecer la diferencia entre los regímenes de humedad, se considera en primer lugar el estado de la sección de humedad, y en segundo lugar el régimen de temperatura del suelo. De esta forma, las categorías usadas para diferenciar los regímenes de humedad son las siguientes (Jarauta, 1989):

- A: sección de control totalmente seca más de la mitad del tiempo acumulado, en que la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es superior a 5°C;
- B: sección de control parcial o totalmente húmeda por lo menos por 90 días consecutivos, cuando la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es superior a 8°C;
- C: sección de control parcial o totalmente seca durante 90 o más días acumulados;
- D: sección de control totalmente seca durante 45 días consecutivos o más, en los cuatro meses que siguen al solsticio de verano;

E: sección de control totalmente húmeda durante 45 días consecutivos o más, en los cuatro meses que siguen al solsticio de invierno;

F: sección de control húmeda en alguna parte durante 180 días acumulados;

G: sección de control húmeda en alguna parte al menos durante 90 días consecutivos.

El sistema para la determinación de los regímenes de humedad, basado en el sistema desarrollado por el Soil Survey Staff, se resume en el Cuadro 5. Aquí se relacionan los distintos regímenes de humedad con la frecuencia, expresada en porcentaje, del total de años de una serie de tiempo, para cada uno de los criterios que definen a los regímenes de humedad.

Cuadro 5. Frecuencias de regímenes de humedad de los suelos según Soil Survey Staff (1975).

Régimen de humedad	Parámetros de temperatura	Criterios Soil Taxonomy						
		A	B	C	D	E	F	G
		Frecuencias de %						
Aridic y Torric		≥50	≤50					
Udic (1)	Tm <22°C y Tv-Ti ≥5°C			≤50	<60			
Udic (2)	Tm ≥22°C y/o Tv-Ti <5°C			≤50				
Ustic (1)	Tm <22°C (I)	≤50		>50	<60	≥60		
	Tv-Ti ≥5°C (II)	≤50		>50		<60		
Ustic (2)	Tm ≥22°C (I)			>50			>50	
	Tv-Ti <5°C (II)			>50				>50
Xeric	Tm <22°C (I)							
	Tv-Ti ≥5°C (II)		≥60		≥60	≥60		

A = Seca ≥ 1/2 días acumulados con T^o > 5°C

B = Húmeda o parcialmente húmeda ≥ 90 días consecutivos con T^o > 8°C

C = Seca o parcialmente seca ≤ 90 días acumulados

D = Seca ≥ 45 días consecutivos en los 4 meses siguientes al solsticio de verano

E = Húmeda ≥ 45 días consecutivos en 4 meses siguientes solsticio de invierno

F = parcialmente húmeda ≥ 180 días acumulados

G = Parcialmente húmeda ≥ 90 días consecutivos

Tm = Temperatura media del suelo a 50 cm

Tv = Temperatura media del suelo en verano

Ti = Temperatura media del suelo en invierno

Fuente: Jarauta (1989)

Modelo de simulación de régimen de humedad de Newhall (1976). El sistema propuesto por el Soil Survey Staff para la clasificación de suelos requiere, a partir de cierta categoría taxonómica, conocer el régimen de humedad del suelo para proceder a su clasificación (Jarauta, 1989). En este sentido, el modelo de Franklin Newhall (1976) tiene la

particularidad de ajustarse a la definición dada por el “Keys to Soil Taxonomi” (Soil Survey Staff, 2010) del régimen de humedad de los suelos.

A partir de los criterios establecidos por el Soil Survey Staff, se establecen los regímenes de humedad en el área de interés a través de un recuento de los diferentes estados de la sección de control a lo largo del año, considerando las frecuencias que definen a cada una de las categorías de regímenes. En el trabajo publicado por Newhall (1976), se resalta que los resultados del modelo deben ser interpretados con sentido común y no mecánicamente. De esta forma, los cálculos se basan en un modelo simple a base de ecuaciones de humedad del suelo que son inexactas en algunos aspectos (Newhall, 1976; citado en Jarauta, 1989).

A partir del modelo de Newhall, se han hecho bastantes trabajos de revisión y perfeccionamiento de este método, con el fin de permitir una predicción más precisa de los regímenes de humedad, en base a la naturaleza de la información disponible. Gasco e Ibañez (1979) pusieron de manifiesto que en el modelo de Newhall se introducen y manejan criterios que no siguen normas basadas en la dicotomía, lo que induce que aparezcan algunas lagunas e indefiniciones, tal que uno de los errores que saltan a la vista en el modelo es que existen coincidencias entre dos subtipos de régimen Udic con otros dos subtipos de régimen Aridic, lo que significa una contradicción, ya que ambos corresponden a suelos con regímenes muy distintos. Paralelamente, se detectaron otras coincidencias entre tres subtipos de regímenes: Udic y Ustic con Aridic (Jarauta, 1989).

Ibañez y Gasco (1983), por su parte, proponen la posibilidad de alterar las secuencias de entrada y de extracción de agua del perfil del suelo, especialmente esta última ya que, en ciertos casos, se puede alterar la dinámica de extracción de agua en el perfil: suelos sin raíces, poca retención de agua en el perfil, con distribución desuniforme de raíces, potencial matricial muy elevado, suelos con horizonte argílico y suelos con presencia de grietas (vertisoles) (Jarauta, 1989).

Modelo de simulación del régimen de humedad de los suelos según Jarauta (1989).

Jarauta propone un modelo de simulación, teniendo en cuenta las observaciones realizadas por diversos autores respecto del modelo de Newhall.

Este modelo propone un único perfil de suelo de 200 mm de capacidad de agua para las plantas, homogéneo, isótropo y bien drenado, segmentado en 64 casillas de 3,125 mm de capacidad cada una para acumular agua. De esta forma, si se consideran situaciones como el que existan contactos líticos o paralíticos, que disminuyen la capacidad de infiltración y de almacenaje de agua en el suelo, Jarauta (1989) propone siete tipos de perfiles para la simulación de situaciones (Figura 1).

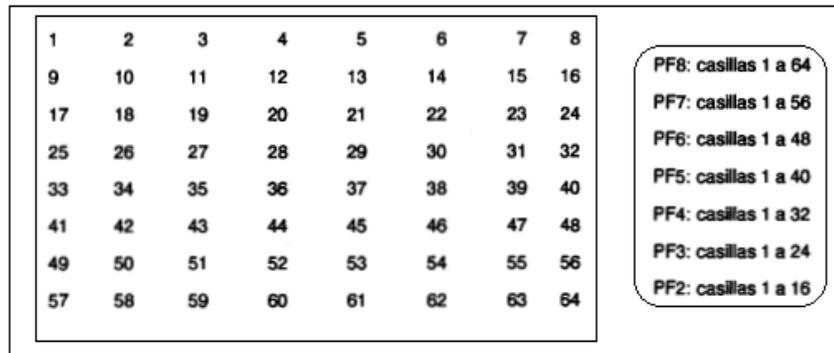


Figura 1. Numeración de celdas y distintos perfiles (PF) de suelo para modelización propuesta por Jarauta (1989).

El modelo propuesto por Jarauta se basa en establecer el balance hídrico en una sección de control del suelo, definida más adelante. A partir de esto, se determinará el contenido de agua en el perfil, y con ello el Régimen de humedad del suelo, según la clasificación definida por el Soil Survey Staff (2010) en el Keys to Soil Taxonomy.

El modelo que propone Jarauta (1989) utiliza datos de precipitación diaria y datos de precipitación mensual. En caso de utilizar datos de precipitación diaria, se establece una cota superior de 75 mm para la cantidad de agua que puede infiltrar en el perfil en un solo día, de acuerdo con el criterio establecido por el Soil Survey Staff (2010).

Para el presente trabajo de memoria, se propone utilizar los datos de Precipitaciones Mensuales (PM), puesto que únicamente se cuenta con esta información, por la dificultad de obtener los valores de precipitaciones diarias para series de tiempo suficientemente largas (más de 30 años). Esta consideración tiene en cuenta que, en caso de que el modelo que se propone en el presente trabajo sea aplicado a otras situaciones, probablemente no se contará con series de datos continuas de más de 30 años de precipitación diaria, razón adicional para que en el presente trabajo no se utilicen estos parámetros. De esta forma, la PM se constituyó como el mecanismo de entrada de agua al perfil en el esquema del balance hídrico.

El mecanismo de salida del agua en el esquema del balance hídrico, corresponde a la evapotranspiración de cultivo (ETc), la cual es determinada a partir de la Evapotranspiración de referencia (ETo). La determinación del valor de ETo para las distintas condiciones existentes en la IV Región requiere contar con un gran volumen de información espacializada.

Una vez que se cuente con la información de la ETo, se procede a calcular la ETc en condiciones óptimas de disponibilidad de agua, mediante la siguiente Fórmula:

$$ETc \text{ (mm día}^{-1}\text{)} = Kc * ETo \text{ (mm día}^{-1}\text{)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde ET_c = Evapotranspiración de cultivo, K_c = coeficiente de transpiración de cultivos, y ET_o = Evapotranspiración de referencia.

Respecto de la determinación de la evapotranspiración en regiones áridas, y por tanto de la estimación de valores del coeficiente K_c para estas condiciones, se han desarrollado una serie de técnicas para su estimación a través de lisímetros (Xu *et al.*, 1998; citado en Mata-González *et al.*, 2005), percepción remota (Goodrich *et al.*, 2000), técnicas micrometeorológicas (Goodrich *et al.*, 2000; Frank, 2003) y métodos para determinar coeficientes de transpiración (Or y Groeneveld, 1994; Steinwand *et al.*, 2001). Estos métodos han sido ideados para operar en condiciones de agricultura con riego (Allen *et al.*, 1998). El fundamento de estos métodos es la determinación del coeficiente de transpiración de los cultivos (K_c), que representa la evapotranspiración de un cultivo dado, como la proporción de esta última en condiciones ideales, o de referencia, sin limitaciones de agua ni nutrientes (Mata-González *et al.*, 2005).

La determinación del coeficiente K_c para vegetación que se desarrolla en regiones áridas y semi-áridas resulta compleja, ya que este valor se calcula en base a una ET_c de cultivos bajo condiciones ideales donde hay ausencia de estrés, como requiere el método propuesto por Allen *et al.* (1998). Este criterio resulta inaplicable en especies que se desarrollan en condiciones de aridez, las cuales tienen una serie de adaptaciones tales como una alta resistencia a la transpiración y una baja cobertura foliar (Evans *et al.*, 1981), una alta regulación estomática y la capacidad de extraer agua del suelo a potenciales mucho mayores a los -1500 kPa (Mata-González *et al.*, 2005). Sin embargo, existen estudios para la determinación de K_c en estas condiciones que han estimado valores que, si bien no son precisos, pueden ser utilizados como valores de referencia.

Para condiciones de climas áridos y semiáridos, en áreas donde exista cobertura vegetal, Wight y Hanks (1981) determinaron valores de K_c para estimar la evapotranspiración en condiciones semiáridas para praderas anuales en Montana, Estados Unidos de América. Los valores que estimaron de transpiración los calcularon con los siguientes valores de K_c : 0,7 en estado de plántula, 0,9 en la etapa de crecimiento medio, y 0,85 en la etapa de pleno crecimiento. Por su parte, Wight y Hanson (1990) realizaron una estimación de evapotranspiración en praderas en condiciones semiáridas en Dakota del Sur, Wyoming e Idaho (Estados Unidos de América), obteniendo valores de K_c en un rango entre 0,79 y 0,85 (Mata-González *et al.*, 2005).

Considerando que los estudios realizados fueron realizados utilizando como base del cálculo de ET_o a la alfalfa como cultivo de referencia (Mata-González *et al.*, 2005), y a que sus estimaciones las realizaron sobre praderas anuales, distintas de la vegetación semiárida propia de una gran extensión de la IV Región de Coquimbo, se utilizará para fines de este estudio los valores más bajos estimados en estos estudios, que corresponde un valor de K_c igual a 0,7.

Para establecer el mecanismo de salida del agua desde el perfil de suelo, por efecto de la ET_c , Jarauta (1989) propuso una serie de secuencias posibles de extracción de agua del

perfil (Figura 2), que se condice con los tipos de perfiles propuestos y detallados en la Figura 1.

	23	22	12	11	4	3	2	1	
perfil	37	25	24	14	13	7	6	5	
PF8	39	38	27	26	16	15	9	8	
	50	41	40	29	28	18	17	10	
	52	51	43	42	31	30	20	19	
	59	54	53	45	44	33	32	21	
	61	60	56	55	47	46	35	34	
	64	63	62	58	57	49	48	46	
	23	22	12	11	4	3	2	1	
perfil	36	25	24	14	13	7	6	5	
PF7	38	37	27	26	16	15	9	8	
	47	40	39	29	28	18	17	10	
	49	48	42	41	31	30	20	19	
	54	51	50	44	43	33	32	21	
	56	55	53	52	46	45	35	34	
	23	22	12	11	4	3	2	1	
perfil	34	25	24	14	13	7	6	5	
PF6	36	35	27	26	16	15	9	8	
	43	38	37	29	28	18	17	10	
	45	44	40	39	31	30	20	19	
	48	47	46	42	41	33	32	21	
	22	21	12	11	4	3	2	1	
perfil	31	24	23	14	13	7	6	5	
PF5	33	32	26	25	16	15	9	8	
	38	35	34	28	27	18	17	10	
	40	39	37	36	30	29	20	19	
	20	19	12	11	4	3	2	1	
perfil	27	22	21	14	13	7	6	5	
PF4	29	28	24	23	16	15	9	8	
	32	31	30	26	25	18	17	10	
	17	16	11	10	4	3	2	1	
perfil	22	19	18	13	12	7	6	5	
PF3	24	23	21	20	15	14	9	8	
perfil	13	12	9	8	4	3	2	1	
PF2	16	15	14	11	10	7	6	5	

PF8; Capacidad de agua disponible: 200 mm
Dividido en 8 * 8 = 64 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 24

PF7; Capacidad de agua disponible: 175 m
Dividido en 7 * 8 = 56 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 24

PF6; Capacidad de agua disponible: 150 mm
Dividido en 6 * 8 = 48 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 24

PF5; Capacidad de agua disponible: 125 mm
Dividido en 5 * 8 = 40 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 24

PF4; Capacidad de agua disponible: 100 mm
Dividido en 4 * 8 = 32 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 24

PF3; Capacidad de agua disponible: 75 mm
Dividido en 3 * 8 = 24 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 24

PF2; Capacidad de agua disponible: 50 mm
Dividido en 2 * 8 = 16 casillas de 3.125 mm cada una
Sección control de humedad: casillas 9 a 16

Figura 2. Secuencias de extracción de agua para cada perfil de suelo propuesto en el modelo de Jarauta (1989).

Otro parámetro considerado en el modelo propuesto, que se condice con los criterios definidos para determinar los regímenes de humedad del Soil Survey Staff (2010), es la temperatura. De esta forma, el modelo utiliza los valores de Temperaturas Medias Mensuales (TMMs) con este propósito, la cual se calcula a partir de la temperatura media mensual del aire, corregida por un factor de corrección según la época del año, a saber: Temperatura invierno (Ti), que abarca los meses entre Abril y Septiembre, y Temperatura verano (Tv), que abarca los meses entre Octubre y Marzo.

Los factores de corrección, estimados por Jarauta (1989) son los siguientes:

$$Ti = Ti(\text{aire}) - 1.6 \tag{Ec. 2}$$

$$Tv = Tv(\text{aire}) + 1.56 \tag{Ec. 3}$$

Donde Ti = Temperatura invierno (°C) y Tv = Temperatura verano (°C).

El resultado del método de clasificación según régimen de humedad y temperatura propuesto por Jarauta (1989), fué el utilizado para ser incluido en el modelo experto de clasificación según Clases de Capacidad de Uso de suelo, cuya ejecución se detalla en la sección resultados.

RESULTADOS

El modelo experto de decisión, como método de clasificación digital, se ejecutó en base a las variables Material parental, Geoformas del paisaje (Relieve) y Regímenes de humedad (Clima), con objeto de lograr la clasificación de la superficie de la Región de Coquimbo según Capacidades de Uso de suelos.

Clasificación según Capacidades de Uso de suelos

A continuación se presenta el procedimiento para generar la información requerida para ejecutar el modelo experto de decisión, dirigido a generar las variables requeridas para clasificar suelos en base a Capacidades de Uso de suelo, detalladas en el Cuadro 1.

Clasificación imágenes satelitales

El proceso de clasificación de las imágenes satelitales tiene por finalidad determinar los tipos de materiales parentales a partir de los cuales se generaron los suelos de la zona de estudio, y con ello generar una aproximación de las Clases texturales de estos, variable requerida para la clasificación de suelos propuesta por el USDA (2014) (Cuadro 1).

Para la clasificación de la superficie regional en distintos tipos de materiales parentales originarios, se utilizó como base para el análisis la combinación de las bandas 7, 4 y 1, utilizando el comando “COMPOSITE” del software ArcMap 10.1, como las bandas roja, verde y azul, respectivamente.

La selección de bandas para la realización del “COMPOSITE”, y posterior análisis espectral, se basa en el trabajo de Gharachelo y Alavipanah (2010), donde se evaluaron 20 combinaciones distintas de bandas, a través de la determinación del “Optimum Index Factor” (OIF) y comparaciones visuales de expertos. De esta forma, se determinó que la combinación más relevante fue la de las bandas 7-4-1, la que demostró tener mayor capacidad para distinguir depósitos de margas y dunas, y otro tipos de depósitos de tipo arenoso, los que son recurrentes en un contexto de ambiente árido-semiárido como el existente en la Región de Coquimbo.

Posterior a la selección de la combinación de bandas, se procedió a realizar una clasificación no supervisada utilizando la herramienta “ISO CLUSTER” en el software de GIS ArcMap 10.1.

El “ISO CLUSTER”, sigla de “Isodata Clustering”, corresponde a un algoritmo que separa todas las celdas, o píxeles, en un número de grupos unimodales definidos por el usuario (“clusters”), dentro del espacio multidimensional de un raster de múltiples bandas espectrales. Este algoritmo consiste en un proceso iterativo que computa la distancia mínima euclidiana cuando asigna cada pixel candidato a un “cluster” o agrupación. Este proceso parte al asignarse en forma arbitraria un promedio a cada “cluster” basado en las distancias de atributos (características espectrales) de los píxeles que pertenecen a un “cluster”, después de la primera iteración. Este proceso se repetirá hasta que a cada pixel de la imagen se le asigne una pertenencia a un “cluster” definido (ESRI, 2014). El que este proceso no sea supervisado, indica que el criterio para definir estas agrupaciones es meramente matemático, basándose en el proceso antes explicado.

El número de “clusters” en que van a ser agrupados los píxeles de la imagen se define desde un principio por el usuario. En este caso, se definieron 16 clases, basado en el criterio experto, el cual indica que ese número es manejable para la interpretación visual humana. El resultado de esta clasificación se puede observar en el Apéndice 2.

A partir del resultado, se compararon las 16 clases con el mapa geológico de Chile digitalizado, específicamente con las secuencias geológicas, a saber: sedimentaria, volcano-sedimentaria, volcánica, intrusiva y metamórfica. Del procedimiento anterior, se procedió a reclasificar estas 16 categorías según su correlación espacial con el mapa de secuencias geológicas, proceso que fue realizado según criterio de semejanza visual.

En este punto, el procedimiento antes descrito tuvo por finalidad afinar la clasificación del mapa geológico de Chile a una escala más fina a la propia de este, que es de 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003), con objeto de acercar la clasificación, a nivel de secuencias, a una escala 1:250.000, que es la escala de clasificación que se pretende alcanzar. Por esta misma razón no se realizó una comparación estadística entre el mapa geológico y las 16 clases obtenidas por el “ISO CLUSTER” no supervisado, ya que al ser tan gruesa en escala el primero, no es comparable en términos de cobertura y distribución espacial con las segundas. En base a lo anterior, se estimó que la comparación más adecuada, dada la naturaleza de la información y el método elegido, es la comparación de la conducta espectral de la superficie regional con las categorías generadas mediante el algoritmo matemático del “ISO CLUSTER”. Una vez realizado este procedimiento, se asignó una secuencia a cada uno de los 16 “clusters”, donde sí se comparó la ubicación de estos últimos respecto a la distribución espacial de las secuencias, usándolas como guía, siempre teniendo en cuenta la escala gruesa con que fueron delimitadas estas últimas.

En el Cuadro 6 se observa la correlación que se hizo entre las 16 categorías, o clusters, con las secuencias geológicas detalladas para la Región de Coquimbo.

Cuadro 6. Correlación entre “clusters” y secuencias geológicas.

Valor cluster	pixeles	Secuencia asignada	ID Secuencia
0	2180077	Sedimentaria	3
1	3813675	fondo	0
2	25283	fondo	0
3	1826966	volcano-sedimentaria	5
4	3117660	volcánica	4
5	6002924	volcano-sedimentaria	5
6	2350485	intrusiva	1
7	4694721	intrusiva	1
8	667446	fondo	0
9	6768434	volcano-sedimentaria	5
10	661706	sedimentaria	3
11	6291039	intrusiva	1
12	5338681	intrusiva	1
13	4434761	intrusiva	1
14	4914586	intrusiva	1
15	2545680	intrusiva	1
16	213959	fondo	0

A partir del Cuadro 6, se puede inferir que existe poca representatividad de algunas secuencias, como lo es la volcánica, representada por un solo cluster (N°4). Sin embargo, si se considera que las secuencias sedimentarias responden a un criterio de fenómeno físico de desplazamiento de masa de material, dado un evento de depósito de materiales por efecto del mar, ríos o eventos aluviales, se infiere que las secuencias volcano-sedimentarias corresponden a materiales volcánicos no distintos de los que se encuentran agrupados como secuencias volcánicas. Por esta razón, las unidades geológicas, agrupadas en las secuencias, son muy parecidas para las dos categorías de secuencias antes mencionadas.

Por otra parte, la descripción de las unidades geológicas define, para la mayoría de secuencias volcano-sedimentarias (Apéndice 1), que se trata de depósitos sedimentarios y volcánicos (SERNAGEOMIN, 2003). Al tratarse de depósitos netamente volcánicos y de depósitos sedimentarios mezclados, resulta necesario separar a las secuencias sedimentarias por otro criterio distinto del espectral, ya que se trata de una mezcla de materiales transportados y depositados indistintamente.

Por esta razón, se separaron las secuencias sedimentarias por un criterio de forma del paisaje, o geoforma. Este procedimiento implicó usar una herramienta de clasificación de geoformas denominado “Topographic Position Index” (TPI), cuyo fundamento y aplicación en la zona de estudio se detalla más adelante. De esta forma, el “cluster” 0 fue separado desde un principio mediante el TPI, procedimiento que es explicado en la próxima sección, y partir de cuyo resultado se separaron las secuencias restantes.

Por otra parte, las secuencias metamórficas son muy escasas en el área de la Región de Coquimbo, describiéndose solo dos unidades geológicas de escasa representatividad espacial. Esto condujo a que no fuesen representadas por ninguna categoría del “ISO CLUSTER”. En base a lo anterior, y considerando una escala de trabajo regional, se desestimó considerar esta secuencia para el trabajo de clasificación de materiales geológicos para la Región de Coquimbo.

Finalmente, existe una superficie regional catalogada como fondo. Esto responde a que la imagen sobre la que se trabajó (composite 7-4-1 del mosaico compuesto por las 6 escenas que abarcan la IV Región), tiene una gran superficie de mar incluida, y a que en los casos de las escenas 1-80, 233-80, 233-81 y 233-82, el factor nubosidad en las imágenes originales seleccionadas para el período estival, con menos incidencia de nubes, aun así presentaron este problema. En el caso de las tres últimas escenas mencionadas anteriormente, se trata de la zona de la cordillera de los Andes, que al tener superficie ocupada por nieve y nubes, se comporta en un rango espectral muy alto, afectando la clasificación espectral realizada, razón por la cual para aquellas condiciones, el procedimiento de “ISO CLUSTER” las separó en “clusters” diferenciables del resto.

El resultado de esta clasificación según secuencias geológicas, que considera las secuencias sedimentarias separadas por geoformas, se puede apreciar en el Apéndice 3.

Una vez determinadas las secuencias geológicas, donde las secuencias sedimentarias fueron separadas a través de las geoformas, proceso explicado más adelante, se correlacionaron las texturas de suelo con las secuencias geológicas a partir de los materiales rocosos que las constituyen. El resultado de este proceso se puede observar en el Apéndice 1.

Determinación de Geoformas del paisaje en base a método TPI

Como se puede apreciar en el Cuadro 1, para la determinación de las Clase de Capacidad de Uso es necesario determinar las Geoformas del paisaje para ejecutar la clasificación, para cuyo objeto se hará uso del TPI para definir estas unidades, como ya se estableció anteriormente.

El TPI compara la elevación de cada pixel en un Modelos de Elevación Digital, o “Digital Elevation Model” (DEM), con el valor promedio de elevación del área específica adyacente a dicho pixel (Weiss, 2001). Para el cálculo del TPI, cuya forma de área específica seleccionada es circular, se utiliza la siguiente ecuación:

$$TPI_{fe} = E_a - E_{cc} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde TPI_{fe} = Índice de posición topográfico para un determinado factor de escala, E_a = elevación media del área (m), y E_{cc} = elevación de la celda central (m).

El TPI calculado con dos tamaños de vecindad para definir el área específica adyacente, provee mayor información sobre las formas del terreno, lo que permite identificar patrones complejos por combinación de áreas específicas adyacentes de distintas escalas (Tagil y Jenness, 2008; citado en Genchi *et al.*, 2011).

Los valores de TPI positivos indican áreas más altas de un pixel que su área específica adyacente, mientras que los valores negativos representan áreas más bajas que sus espacios circundantes (Weiss, 2001).

Se han estandarizado los tipos de geoformas detectables a partir de un valor de TPI a una distancia larga desde la celda evaluada (“Large Neighborhood”, LN), y a una distancia corta desde la celda evaluada (“Small Neighborhood”, SN), cuyos parámetros de TPI para definir las se pueden apreciar en el Cuadro 7

Cuadro 7. Geoformas del paisaje a partir de dos escalas distintas de “neighborhood”.

Geoforma (Weiss, 2001)	Geoforma (traducción)	SN	LN	Pendiente
Canyons, deeply incised streams	Cañones, arroyos en quebradas profundas	$TPI \leq -1$	$TPI \leq -1$	
Midslope drainages, shallow valleys	Drenajes de media pendiente, valles poco profundos	$TPI \leq -1$	$-1 < TPI < 1$	
Upland drainages, headwaters	Drenajes de zonas altas, nacientes de cauces	$TPI \leq -1$	$TPI \geq 1$	
U-shaped valleys	Valles en forma de U	$-1 < TPI < 1$	$TPI \leq -1$	
Plains	Planos	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	$\leq 5^\circ$
Open slopes	Pendientes abiertas	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	$> 5^\circ$
Upper slopes, mesas	Pendientes de altura, mesetas	$-1 < TPI < 1$	$TPI \geq 1$	
Local ridges/hills in valleys	Estribaciones locales, colinas en valles	$TPI \geq 1$	$TPI \leq -1$	
Midslope ridges, small hills in plains	Estribaciones de pendientes medias, pequeñas colinas en planos	$TPI \geq 1$	$-1 < TPI < 1$	
Mountain tops, high ridges	Cimas de montañas, estribaciones altas	$TPI \geq 1$	$TPI \geq 1$	

Fuente: Jenness (2006)

Adicionalmente, para las categorías de geoformas “Plains” y “Open slopes”, se utiliza el criterio de pendiente de la geoforma para diferenciar ambas categorías, como criterio para diferenciar entre un plano con pendiente cero, con un plano inclinado, respectivamente.

Para la aplicación del TPI se requiere de los DEMs. Estos corresponden a modelos cuantitativos de la superficie terrestre en formato digital (Burrough y McDonnell, 1998), constituyéndose como un método para subdividir el paisaje en orden a representar la topografía local. Los DEMs a utilizar se obtuvieron a partir del satélite TERRA, cuya denominación formal es Earth Observing System (EOS) AM-1, mediante el sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer) (Lau, 2004). De esta forma, el DEM a utilizar fue obtenido y descargado a partir de la página <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>, resultado de la colaboración entre el “Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan” (METI) y la “National Aeronautics and Space Administration” (NASA). El detalle de las escenas descargadas se puede observar en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Detalle escenas DEM descargadas.

Escena	Satélite	Sensor	Ubicación		Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica (bits)
			Paralelo	Meridiano		
ASTGTM2_S30W070			30 S - 29 S	70 O - 69 O		
ASTGTM2_S30W071			30 S - 29 S	71 O - 70 O		
ASTGTM2_S30W072			30 S - 29 S	72 O - 71 O		
ASTGTM2_S31W070			31 S - 30 S	70 O - 69 O		
ASTGTM2_S31W071	(EOS) AM-1	ASTER	31 S - 30 S	71 O - 70 O	30	16
ASTGTM2_S31W072			31 S - 30 S	72 O - 71 O		
ASTGTM2_S32W071			32 S - 31 S	71 O - 70 O		
ASTGTM2_S32W072			32 S - 31 S	72 O - 71 O		
ASTGTM2_S33W071			33 S - 32 S	71 O - 70 O		
ASTGTM2_S33W072			33 S - 32 S	72 O - 71 O		

A partir de estas escenas, cada una correspondiente a una sección del DEM que abarca la Región de Coquimbo, se procedió a realizar la unión de estas secciones en el software ArcMap 10.1.

Con esta información, se aplicó el TPI sobre el DEM regional a distintas escalas de “neighborhoods”, de forma de evaluar la escala de trabajo más adecuada para la evaluación de geoformas en el contexto de la Región de Coquimbo. Las escalas de “neighborhoods” evaluadas, fueron las siguientes (SN y LN): 2500 y 5000 metros; 500 y 2000 metros; 130 y 360 metros y 60 y 120 metros.

La combinación de “neighborhoods” que dio los resultados con un detalle mayor, sin el problema de generalización en unas pocas clases de geoformas, fue la que tuvo por parámetros de distancia para SN y LN de 60 y 120 metros, respectivamente. Esto se debió fundamentalmente a la geografía accidentada característica de la Región de Coquimbo, que requiere por tanto un nivel de escala de trabajo fina para poder distinguir la variabilidad en las geoformas reconocibles en el área de estudio.

Una vez determinada los parámetros de “neighborhood”, se procedió a ejecutar el TPI en toda la superficie regional. De esta forma, el resultado obtenido luego de procesar el TPI de 60 m (SN) y 120 m (LN), se puede observar en el Apéndice 4.

El resultado del TPI fue utilizado por sí solo en el modelo experto detallado posteriormente, y adicionalmente, fue utilizado para determinar las secuencias sedimentarias *a priori* sobre las definidas mediante el “ISO CLUSTER” en el procedimiento de clasificación de imágenes, detallado anteriormente. Con este último propósito, se llevó a cabo el procedimiento explicado a continuación.

Separación de Secuencias Geológicas Sedimentarias a partir del TPI. El TPI es una herramienta que permite identificar geoformas, lo que es de especial utilidad para reconocer formas del paisaje relacionadas con eventos de movimientos de materiales y posterior depósito, como lo son los sedimentos. En este sentido, las secuencias geológicas

Sedimentarias, detalladas en el Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003) (Apéndice 1), responden a un proceso de formación de paisaje más que a un tipo de material rocoso en particular. Por esto último, el TPI resultó de gran utilidad para identificar estas secuencias en la superficie de la Región de Coquimbo.

El TPI utilizado no fue procesado con el módulo “FILTER”, correspondiente al primer paso del procesamiento del TPI listado anteriormente, puesto que se quiso captar toda la variabilidad espacial posible, y así tener la capacidad de determinar en detalle la distribución espacial de las secuencias geológicas sedimentarias.

Para lograr este objetivo, se multiplicó el TPI con el raster de pendientes, este último generado a partir del DEM regional, proceso que fue ejecutado en el software ArcMap 10.1. Con este fin, se realizó una reclasificación del raster de pendientes, según las categorías definidas para pendientes complejas por el CIREN (2005), las que se pueden observar en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación de pendientes complejas.

Categoría	Rango de pendiente (%)
Casi plano	1-3
Ligeramente ondulado	2-5
Suavemente ondulado	5-8
Moderadamente ondulado	8-15
Fuertemente ondulado	15-20
De lomajes	20-30
De cerros	30-50
Montañas	> 50

Fuente: CIREN (2005)

Una vez multiplicados el TPI por las pendientes reclasificadas según los rangos del Cuadro 9, se identificaron las unidades que, en base a esta correlación, se ajustaron al tipo de formas del paisaje que no se correlacionan con los depósitos sedimentarios, utilizando el criterio experto, tal que las restantes combinaciones posibles se las clasificó como secuencias sedimentarias. Las unidades seleccionadas se observan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Categorías no sedimentarias, resultado de la multiplicación entre raster del TPI de 60 m (SN) y 120 m (LN) no procesado, y raster clasificación según pendientes complejas.

Código	Geoforma	Categoría pendiente compleja
110	Mountain tops	Casi plano
210	Mountain tops	Ligeramente ondulado
404	U-shapped valleys	moderadamente ondulado
410	Mountain tops	moderadamente ondulado
501	Canyons, deeply incised streams	Fuertemente ondulado
601	Canyons, deeply incised streams	Lomajes
604	U-shapped valleys	Lomajes
609	Midslope ridges, small hills in valleys	Lomajes
610	Mountain tops	Lomajes
701	Canyons, deeply incised streams	Cerros
702	Midslope drainajes, shallow valleys	Cerros
703	Upland drainages, headwaters	Cerros
704	U-shapped valleys	Cerros
707	Upper slopes, mesas	Cerros
710	Mountain tops	Cerros
801	Canyons, deeply incised streams	Montañas
802	Midslope drainajes, shallow valleys	Montañas
803	Upland drainages, headwaters	Montañas
804	U-shapped valleys	Montañas
810	Mountain tops	Montañas

A partir de esta clasificación se separaron las secuencias geológicas sedimentarias, lo que permitió separar estas últimas del resto de las secuencias determinadas a través de un “ISO CLUSTER” no supervisado.

Determinación del régimen de humedad del suelo

Jarauta (1989) propone algunas modificaciones en las ecuaciones lógicas que definen a los regímenes de humedad informadas por el Soil Survey Staff (1975), que incluyen a los subtipos de los regímenes de humedad, en base a las modificaciones que han sido revisadas anteriormente. En el Cuadro 11 se observan las ecuaciones lógicas propuestas, y en el Cuadro 12 el criterio para establecer los regímenes de humedad en base a las categorías definidas por el Soil Survey Staff (2010).

Cuadro 11. Ecuaciones lógicas que describen los regímenes de humedad de los suelos de acuerdo a los criterios propuestos por el Soil Survey Staff (1975).

Regimen de humedad	Temperatura del suelo	Ecuación lógica
Aridic (1)	$T_m \leq 22^\circ\text{C}$ y $T_v - T_i > 5^\circ\text{C}$	(A=1) y (B=0)
Udic (1)		(C=0) y (D=0) y no ((A=1) y (B=0))
Ustic (1)-I		(A=0) y (C=1) y (D=0) y (E=1)
Ustic (1)-II		(A=0) y (C=1) y (E=0)
Xeric-I	$T_m > 22^\circ\text{C}$ y/o $T_v - T_i \leq 5^\circ\text{C}$	(A=0) y (B=0) y (D=1) y (E=1)
Xeric-II		(A=1) y (B=1) y (D=1) y (E=1)
Xeric-III		(A=0) y (B=1) y (D=1.) y (E=1)
Aridic (2)		(A=1) y (B=0)
Udic (2)		(C=0) y no ((A=1) y (B=0))
Ustic (2)-I		(C=1) y (F=1) y no ((A=1) y (B=0))
Ustic (2)-II		(C=1) y (F=0) y no ((A=1) y (B=0))
Ustic (2)-III		(C=1) y (F=1) y (G=1) y no ((A=1) y (B=0))

Fuente: Jarauta (1989)

Cuadro 12. Definiciones de regímenes de humedad propuestas por Jarauta (1989).

Regímenes de Humedad (en regímenes de temperatura no tropicales)	Criterios Soil Taxonomy				
	A	B	C	D	E
Aridic (1)-1	1	0	1	1	1
Aridic (1)-2	1	0	1	1	0
Aridic (1)-3	1	0	1	0	1
Aridic (1)-4	1	0	1	0	0
Aridic (1)-5	1	0	0	1	1
Aridic (1)-6	1	0	0	1	0
Aridic (1)-7	1	0	0	0	1
Aridic (1)-8	1	0	0	0	0
Xeric-I-1	0	0	1	1	1
Xeric-I-2	0	0	0	1	1
Xeric-II-1	1	1	1	1	1
Xeric-II-2	1	1	0	1	1
Xeric-III-1	0	1	1	1	1
Xeric-III-2	0	1	0	1	1
Udic (1)-1	1	1	0	0	1
Udic (1)-2	1	1	0	0	0
Udic (1)-3	0	1	0	0	1
Udic (1)-4	0	1	0	0	0
Udic (1)-5	0	0	0	0	1
Udic (1)-6	0	0	0	0	0
Ustic (1)-I-1	0	1	1	0	1
Ustic (1)-I-2	0	0	1	0	1
Ustic (1)-II-1	0	1	1	1	0
Ustic (1)-II-2	0	1	1	0	0
Ustic (1)-II-3	0	0	1	1	0
Ustic (1)-II-4	0	0	1	0	0
Perxeric	1	1	1	1	0
Fuera de control	1	1	1	0	1
	1	1	1	0	0
	1	1	0	1	0
	0	1	0	1	0
	0	0	0	1	0

Fuente: Jarauta (1989)

Donde los criterios A, B, C, D y E se detallan en el Cuadro 5.

Para fines del presente trabajo, se contó con información espacializada de ETo (en formato raster), PM y TMM para toda la región, lo que implica reducir el volumen de cálculos en forma considerable, con información fidedigna y validada.

La información climática en base a la cual se aplicó el modelo de Jarauta (1989), consta de promedios mensuales de ETo (mm mes^{-1}), Precipitación Mensual (PM) (mm mes^{-1}) y Temperatura Media Mensual (TMM) ($^{\circ}\text{C}$). De esta forma, se utilizó un solo valor promedio, para cada variable, por mes, lo que permitió reducir considerablemente el volumen de datos requeridos para ejecutar el modelo.

La aplicación de los parámetros PM y ETc en el modelo, requiere establecer un perfil tipo, seleccionado entre el rango de opciones propuestas por Jarauta. Con este fin, se determinó un perfil tipo uniforme para toda la región con una capacidad de retención de agua de 75 mm, correspondiente al perfil tipo PF3 (Figura 1). La decisión de asignar un solo perfil tipo, para representar a toda la región de estudio, tuvo que ver con las características de los suelos de esta, los cuales son jóvenes y por tanto de escaso desarrollo pedogénico, y con bajos contenidos de materia orgánica (Luzio, 2010), factores que determinan que se trate de suelos con poca capacidad de retención de agua, en términos generales.

El procedimiento para determinar los Regímenes de humedad en la Región de Coquimbo, basado en la proposición de Jarauta (1989), se detalla a continuación:

- 1) Se ingresaron las variables ETo, PM y TMM en una planilla generada en el software Excel 2010, la que se diseñó con objeto de recrear un balance hídrico mensual en un perfil tipo PF3, donde, en base a la conducta del agua en la sección de control comprendida entre los casilleros 9 al 24 del perfil (Figura 2), se estableció la presencia o ausencia de los criterios A, B, C, D y E, detallados en el Cuadro 5.
- 2) En el software ArcMap 10.1 Se realizó una clasificación no supervisada en 5 categorías espaciales en la superficie de la Región de Coquimbo, mediante el procedimiento "ISO CLUSTER". El parámetro utilizado para realizar esta separación fue la PM y la TMM, sobre cuyos valores el "ISO CLUSTER" no supervisado realizó la determinación de los "clusters". Se utilizó la PM y la TMM para este procedimiento, ya que estos son los parámetros relacionados en forma más directa con el Clima preponderante.

Con el resultado, se realizó la siguiente secuencia de procedimientos, a saber: "Majority filter", "Boundary clean", "Region group", "Extract by attributes" y "Nibble". Aquí, en el paso "Extract by attributes", el criterio lógico para eliminar pixeles innecesarios, fue considerar unidades espaciales de más de 320.000 pixeles.

Finalmente, se obtuvo la misma cantidad de cinco unidades espaciales representativas para cinco condiciones climáticas de la zona de estudio, las cuales se pueden apreciar en la Figura 3.

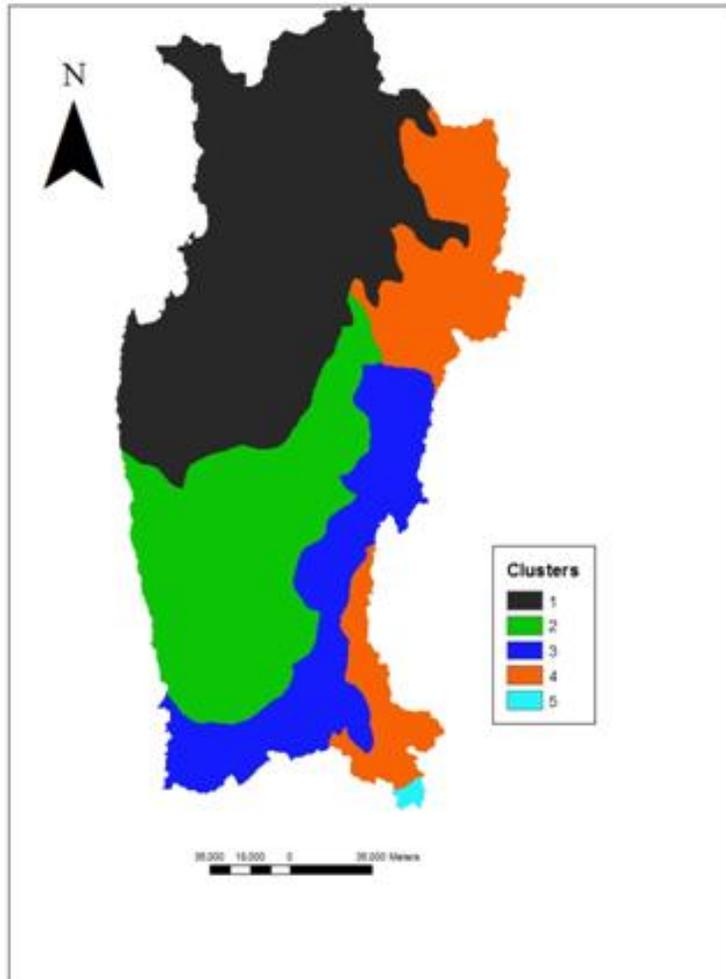


Figura 3. Categorías climáticas de la Región de Coquimbo a partir de ISO CLUSTER no supervisado cuyas variables de entrada fueron la PM y la TMM.

- 3) En base a la separación espacial en 5 grandes unidades, se aplicó el procedimiento “ZONAL STATISTICS” como tabla, herramienta que realiza un resumen de valores estadísticos de un “raster”, para las variables climáticas ETo, PM y TMM en este caso, a partir de una separación espacial previa para el área comprendida por el “raster”, informándolos como tabla (ESRI, 2014).

Se calcularon los valores promedio de ETo, PM y TMM, para cada una de las 5 unidades reconocidas, cuyos resultados se puede observar en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Valores promedios mensuales de Evapotranspiración de referencia (ETo), Precipitación Mensual (PM) y Temperatura Media Mensual (TMM).

Zona	Parámetro	Mes											
		enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1	PM (mm mes ⁻¹)		0,10	0,43	1,75	6,45	16,97	21,57	11,58	3,59	0,91	0,22	0,05
	TMM (°C)	18,96	18,35	16,79	14,62	12,43	10,78	10,22	10,63	12,16	14,32	16,53	18,53
	Eto (mm mes ⁻¹)	175,16	146,30	131,61	90,61	65,59	49,58	51,75	66,36	90,21	88,75	157,39	175,10
2	PM (mm mes ⁻¹)		0,40	1,50	5,44	17,55	40,36	47,97	26,96	9,32	2,65	0,71	0,19
	TMM (°C)	18,53	17,89	16,33	14,16	11,98	10,34	6,69	10,19	11,71	13,85	16,06	17,76
	Eto (mm mes ⁻¹)	168,22	140,94	127,01	87,68	63,68	48,41	51,00	65,99	89,51	85,48	154,12	169,10
3	PM (mm mes ⁻¹)		0,94	3,25	10,84	31,99	67,76	77,65	44,86	16,58	5,09	1,48	0,42
	TMM (°C)	15,64	15,12	13,82	12,00	10,17	8,80	8,25	8,67	9,95	11,75	13,59	15,01
	Eto (mm mes ⁻¹)	154,72	129,47	116,15	79,73	57,55	43,59	46,02	60,02	81,85	77,39	141,99	155,36
4	PM (mm mes ⁻¹)		0,89	3,07	10,29	30,85	67,40	78,89	44,93	16,15	4,87	1,40	0,40
	TMM (°C)	12,50	12,01	10,75	8,98	7,20	5,86	5,32	5,74	6,99	8,74	10,54	11,90
	Eto (mm mes ⁻¹)	145,45	121,23	108,24	73,72	52,71	39,50	41,30	53,65	73,73	71,73	130,83	145,18
5	PM (mm mes ⁻¹)		3,22	10,50	32,77	89,41	174,98	193,11	114,91	45,34	14,91	4,60	1,39
	TMM (°C)	8,40	7,91	6,67	4,95	3,21	1,90	1,38	1,79	3,00	4,71	6,46	7,80
	Eto (mm mes ⁻¹)	115,41	96,16	84,87	56,76	39,70	29,29	30,67	40,62	56,87	54,72	104,15	115,30

- 4) Los resultados obtenidos en el paso 3 se ingresaron en la tabla generada en el paso 1, dando por resultado un Régimen de Humedad Arídico para las 5 unidades espaciales diferenciadas.

Esquema de modelo experto de decisión

En base a los factores de formación de suelos, considerados para la determinación de las variables requeridas para la aplicación del modelo de decisión experta, se generó el diseño del esquema de decisión simple. Este último no corresponde a un modelo cuantitativo, que no es aplicable en este caso, sino a uno cualitativo, que es más idóneo para ser aplicado, por adecuarse mejor a las condiciones de trabajo, dada la naturaleza mixta de la información con que se cuenta, que es tanto cualitativa como cuantitativa.

Dadas las variables anteriormente detalladas, con las que se dispuso para el diseño del modelo de decisión experta, se generó el esquema para determinar las capacidades de uso de suelo en la Región de Coquimbo, detallado en la Figura 4.

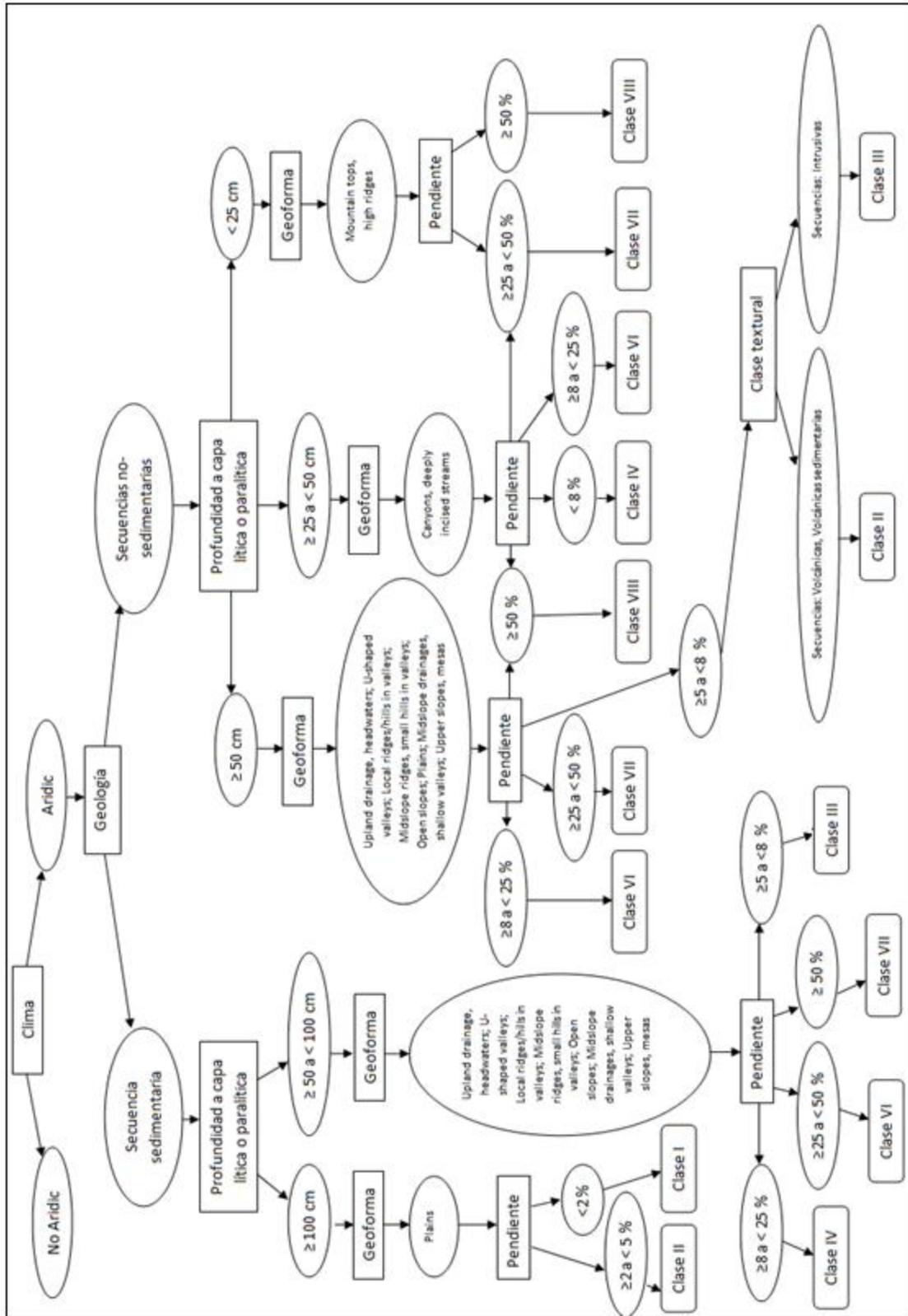


Figura 4. Diseño del modelo de decisión para definir Capacidades de Uso de suelos en la Región de Coquimbo.

El esquema de la Figura 4 es el resultado de la interpretación de los criterios propuestos por el USDA (Cuadro 1), donde el factor al cual se le ha dado más relevancia en la regla de decisión es el relieve, o geoformas del paisaje, las cuales se han relacionado directamente con los parámetros profundidad a la capa lítica o paralítica y pendiente. Esta relevancia conferida al factor relieve se fundamenta en que, al tratarse de una zona donde el clima varía muy poco (toda la región fue clasificada bajo el régimen de humedad Arídico a partir del modelo de Jarauta), la topografía adquiere una relevancia especial en la zona de estudio, cuya complejidad en este sentido se puede apreciar en el detalle de escala requerido para la ejecución del TPI.

Respecto al material parental, a este factor se le ha asignado relevancia a un nivel general de secuencia geológica. Esto se debió a que, mediante el proceso de “ISO CLUSTER”, utilizado para identificar en la imagen satelital los distintos tipos de materiales geológicos, solo se logró distinguir y diferenciar las secuencias geológicas, ya que al ejecutar el mismo procedimiento, esta vez para separar a nivel de unidades geológicas (Apéndice 1), no se lograron diferenciar las unidades geológicas dentro de las secuencias. Por esta razón, no se logró asignar una clase textural a una categoría representada espacialmente, sin perjuicio de lo cual se hizo uso de las secuencias geológicas en el modelo como factor de discriminación inicial.

En el Cuadro 1, se observa que las Clases de Capacidad de Uso de suelo I y II no se encuentran en Regímenes de humedad Arídico. Ahora bien, se hizo uso de las secuencias geológicas para identificar las posiciones de fondos de valles, los cuales, al estar en posición de terrazas fluviales, no son considerados como suelos de secano con escaso desarrollo (Cepeda *et al.*, 2008). Por otra parte, los suelos comprendidos dentro de la secuencia geológica sedimentaria, también incluyen terrazas marinas, lacustres y posiciones distales de piedemontes, situaciones donde, por tratarse de depósitos de material relativamente profundos, en términos generales, y por tener una capacidad de captación de precipitaciones mayor, por sus pendientes bajas, tienen un mayor potencial de desarrollo pedogenético, lo que determina que sean considerados como suelos de secano con un potencial de desarrollo de perfil en profundidad, pese a encontrarse bajo un régimen de humedad Arídico. De esta forma, por la geología del área de estudio, se lograron identificar las excepciones a la condición climática para las Clases de Capacidad de Uso de suelo I y II.

En la Figura 4 se observa que la Clase III es clasificada dentro de las Secuencias Sedimentarias para las cuales no hay asociados suelos de texturas arcillosas (Apéndice 1), contradiciendo las reglas detalladas en el Cuadro 1. Esto se determinó de esta forma, ya que el criterio de pendiente se consideró más relevante en la regla de decisión que la textura, esta última determinada en forma menos precisa que la inclinación del terreno.

En la Figura 4, la sección donde se separa entre la Clases de Capacidad de Uso II y III, dentro de las secuencias no sedimentarias, involucra el uso de la textura como criterio clave. Esta separación parte del criterio de que las unidades espaciales comprendidas dentro de las secuencias volcánicas y volcánicas-sedimentarias, presentan texturas de tipo

arcillosas (Apéndice 1). Esto último implica que, en posición de pendiente entre 5 y 8 %, estas sean menos susceptibles a erosión por efecto de la escorrentía superficial que los suelos comprendidos dentro de las secuencias intrusivas, que corresponden a suelos de clases texturales franco arenosas (Apéndice 1), más susceptibles a este tipo de erosión. Este criterio fue el que determinó el criterio de separación en las clases II y III por clase textural. Por otra parte, y en esta misma sección del modelo, la Clase II se la considera excepcionalmente dentro del rango de pendientes de 5 a 8 %, puesto que por criterio experto se determinó que la textura de suelos, identificada en este caso, es un factor relevante al cual se supedita la pendiente, en zonas con rangos de pendiente suavemente onduladas (Cuadro 9).

Resultados clasificación según Clases de Capacidad de Uso de suelos

El resultado de la aplicación del modelo experto de decisión propuesto (Figura 4), se puede observar en la Figura 5.

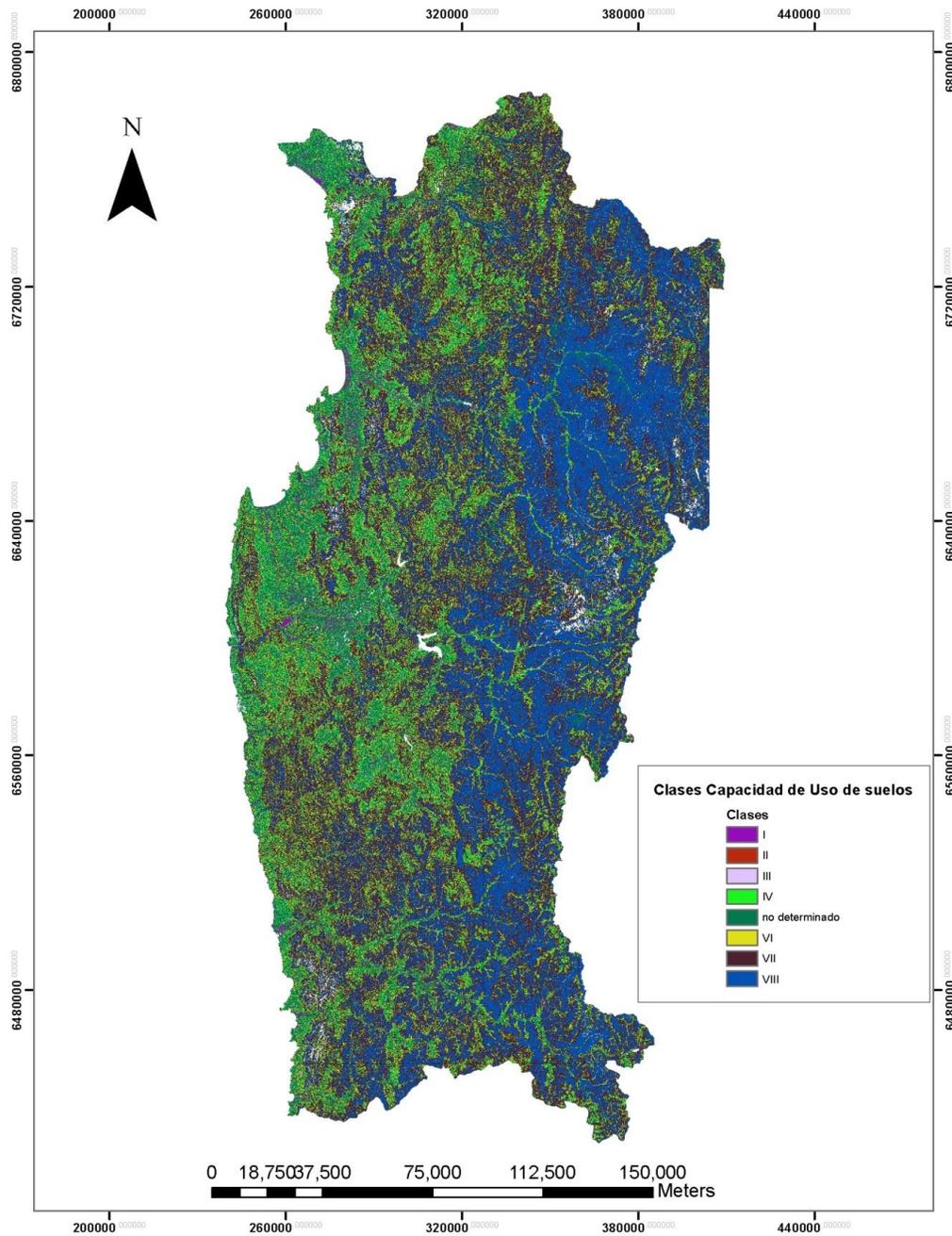


Figura 5. Clasificación espacial Región de Coquimbo según Capacidad de uso de suelos.

En la Figura 5 se muestra el resultado de la aplicación del modelo experto de decisión, cuya información de superficie comprendida por casa Clase de Capacidad de Uso se detalla en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Información de clasificación de superficies resultado de aplicación de modelo experto de decisión.

Capacidad de laboreo	Clase Capacidad de Uso	pixeles	Área	Área	Representatividad según capacidad de laboreo
			(ha)	(%)	(%)
Arable	Clase I	270421	24337,89	0,62	8,02
	Clase II	325870	29328,30	0,74	
	Clase III	459693	41372,37	1,05	
	Clase IV	2455308	220977,72	5,60	
No arable	Clase VI	5096764	458708,76	11,63	74,18
	Clase VII	15866913	1428022,17	36,22	
	Clase VIII	11534176	1038075,84	26,33	
---	No determinado	7797413	701767,17	17,80	17,80

Como se observa en el Cuadro 14, entre las Clases de Capacidad de Uso I y VIII, se constata que la categoría de Capacidad de laboreo que se encuentra más representada es la no arable, con un 74,18% de la superficie regional analizada. Paralelamente, existe una proporción de la superficie regional que no cumple las condiciones para ser clasificadas dentro de las categorías de Clases de Capacidad de Uso detalladas en la Figura 4, catalogadas como “no determinado” en el Cuadro 14, situación que será analizada más adelante.

En el Cuadro 15 se considera, a modo de primera instancia de análisis, solo la superficie clasificada según Clase de Capacidad de Uso.

Cuadro 15. Información de superficies asignadas según Capacidad de Uso de suelo, resultado de aplicación de modelo experto de decisión.

Capacidad de laboreo	Clase Capacidad de Uso	pixeles	Área	Área	Representatividad según capacidad de laboreo
			(ha)	(%)	(%)
Arable	Clase I	270421	24337,89	0,75	9,75
	Clase II	325870	29328,30	0,90	
	Clase III	459693	41372,37	1,28	
	Clase IV	2455308	220977,72	6,82	
No arable	Clase VI	5096764	458708,76	14,15	90,25
	Clase VII	15866913	1428022,17	44,06	
	Clase VIII	11534176	1038075,84	32,03	

Análisis de resultados de superficie clasificada según Capacidad de Uso

Como se puede observar en el Cuadro 15, respecto de las Clases de Capacidad de uso del tipo arables, estas se presentaron en el 9,75% de la superficie de la Región de Coquimbo. Esta superficie incluye una variedad de zonas cuyo rasgo común es presentar condiciones de relieve aptas para el laboreo de suelo; sin embargo, estos suelos son probablemente dispares en cuanto a otros tipos de características de suelo, tanto de naturaleza física como química, las cuales no han sido consideradas en el presente estudio. En este sentido, los resultados obtenidos permiten formar una idea sobre la ocurrencia de suelos de distintas Clases de Capacidad de Uso, pero no implican una clasificación definitiva en este sentido.

Las Clases VI, VII y VIII constituyen el grupo de los suelos no arables, dadas sus limitaciones para su laboreo (Casanova, 2010). Es así que el 90,25% de la suelos de la Región de Coquimbo ha sido clasificado como no arables, suelos cuyas limitaciones requieren una alta exigencia de recursos y esfuerzo para su habilitación. En este sentido, se trata de una cifra esperable, considerando la geografía accidentada de la zona de estudio.

Un estudio realizado en la Región de Coquimbo por el IREN (1961), reporta una estimación de superficie de suelo clasificada según Capacidad de Uso, el cual abarcó los valles del Elqui, Limarí, Choapa y Quilimarí. De esta forma, en aquel trabajo se asignó un porcentaje de 69,22% del total a las Clases del tipo no arables. Esta cifra indica que el rango de magnitud, asociado a suelos clasificados dentro de la categoría no arable, es alto para la zona de estudio, lo que concuerda con el resultado informado en el Cuadro 15 para las clases no arables, del orden del 90,25%. Resulta evidente que el estudio realizado por el IREN subestima la superficie no arable informada en el Cuadro 15, lo cual se debe a que este estudio no consideró las zonas de serranías y de alta montaña, que abarcan una gran proporción de la Región de Coquimbo. Sin perjuicio de los anterior, el estudio del IREN da luces respecto a la magnitud de la superficie no apta para la agricultura en la Región, especialmente si se considera que el valor de 69,22% aplica únicamente para los grandes valles agrícolas de esta, como se mencionó anteriormente.

Clase I. Respecto de la Clase de Capacidad de Uso I, en el Cuadro 15 se observa que la superficie clasificada como tal abarca el 0,75% del área clasificada, la cual se encuentra dentro del rango del 3,3% de área utilizada para fines agrícolas a nivel regional (CONAF *et al.*, 2004), ésta última concentrada fundamentalmente en las terrazas del fondo de los grandes valles fluviales (Novoa y Lopez, 2001).

En el Apéndice 5 se observa que los suelos Clase I se concentran en sectores de la franja litoral, en fondos de valles, y en ciertos sectores ubicados en la Cordillera de Los Andes.

Respecto a los suelos Clase I en la franja litoral, estos concentran su ocurrencia fundamentalmente en las desembocaduras de ríos, donde se evidencia la influencia marina y fluvial, que han generado terrazas por efecto de la depositación de material como sedimentos. Esta situación es clara en las desembocaduras de los ríos Elqui, Limarí y

Choapa, del Estero Pupío y del río Quilimarí. Respecto de los ríos Elqui y Limarí, corresponden a valles de origen fluvial, que en sus cursos medios e inferiores presentan un completo sistema de terrazas correspondientes a superficies de sedimentación marina, las cuales se pueden encontrar hasta una distancia de unos 25 km desde la desembocadura, caso del río Elqui. Por otra parte, a nivel regional, el valle del río Limarí presenta en su curso inferior la mayor superficie de terrazas fluviales, formando un triángulo encerrado por las localidades de Socos (30°44'S-71°31'O), Salala (30°40'S-71°31'O) y Ovalle (30°36'S-71°12'O) (Novoa y Lopez, 2001). De esta forma, en el caso de los cursos inferiores de los valles Elqui y Limarí, es donde existe la mayor superficie asignada a la Clase I.

Respecto de la desembocadura del Estero Pupío, se encuentra en un contexto de planos de sedimentación fluvio-marina, lo que permite la ocurrencia de un pequeño humedal, asociado a la laguna Conchalí, zona donde precisamente el modelo ha detectado suelos Clase I, dada las pendientes menores a 2% y a los suelos profundos esperables en estas condiciones.

El valle del río Choapa no conserva terrazas de influencia marina hacia su interior, lo que determina que no existan grandes superficies con pendientes menores a 2%, con excepción de la desembocadura del río, en las inmediaciones del pueblo de Huentelauquén, y en forma disgregada en el fondo del valle, especialmente a lo largo del curso del río entre Salamanca y el mar, y los alrededores de este último poblado.

Respecto a la franja litoral del extremo norte de la región, la mayor superficie catalogada como Clase I se encuentra en la amplia superficie de sedimentación fluvio-marina vinculada a la quebrada Los Choros (Novoa y Lopez, 2001), situación que se condice con las pendientes menores a 2% que se observan en esta explanada.

Otra zona donde se observa presencia de suelos Clase I corresponde a las terrazas marinas en las proximidades del pueblo de Tongoy. Esta corresponde a una paleo-bahía generada a partir de transgresiones y regresiones del mar relacionadas con movimientos de placas y variaciones del nivel del mar, las que han generado terrazas de depositación de material desde el Mio-Pleistoceno, unidad geológica denominada Formación Coquimbo (Pfeiffer *et al.*, 2012). En este contexto, las terrazas marinas han sido disectadas por una serie de cursos de agua que han generado el traslado de material, cuyo depósito en la zona litoral ha originado las condiciones para existencia de los humedales de Pachingo y Salinas Grande. De esta forma, las terrazas, dadas sus condiciones de pendientes bajas y probabilidad de suelos profundos, y los humedales y fondos de los sistemas de drenaje de la bahía, han sido clasificadas en pequeñas unidades distribuidas a lo largo de la bahía y su interior como Clase I.

Existen situaciones particulares clasificadas como Clase I en la zona cordillerana de Los Andes, y que se deben a situaciones particulares poco frecuentes, tales como el tranque de relaves de la mina los Pelambres y la mina a tajo abierto, ubicados en el cauce alto del río

Cuncumén, afluente del río Choapa. Otra situación particular corresponde a los depósitos lacustres en las riberas de la laguna El Pelao, clasificados igualmente como Clase I.

Clases II y III. A partir de los resultados del modelo, cuyo detalle para las Clases II y III se encuentran en el Apéndice 6, se puede constatar que estas se encuentran distribuidas fundamentalmente en los valles y quebradas de la zona de estudio. En la Región de Coquimbo, los valles presentan un completo sistema de terrazas que corresponden a superficies de sedimentación marina en sus cursos medio e inferior, y fluvial en sus cursos altos (Novoa y Lopez, 2001). Esto último ha determinado la existencia de una serie de terrazas que, producto de procesos posteriores de sedimentación aluvial y procesos de remoción de masa de naturaleza coluvial, han dado paso a un paisaje intermontano con gran variabilidad en términos de formas y rangos de pendiente.

Relativo a la Clase II, esta se encuentra distribuida en forma homogénea, en los fondos de valles fluviales y en las planicies litorales, zonas cuya geología corresponde a depósitos Sedimentarios (Apéndice 3). Esta situación ocurre ya que el rango de pendientes que definen a la Clase II (2 a 5%) se presenta fundamentalmente en posiciones del paisaje correspondientes a depósitos de sedimentos transportados y depositados por ríos y por la entrada del mar en el continente, como ya se ha mencionado anteriormente. Adicionalmente, las profundidades de esos depósitos tienden a ser profundas, asignándose en el modelo de clasificación experta (Figura 4) profundidades de suelo esperadas entre 50 y 100 cm a los suelos donde se presenten las Secuencias Geológicas Sedimentarias.

En el Apéndice 6 se observa que existe presencia de suelos Clase II en forma relativamente homogénea en las planicies litorales donde, con excepción de las desembocaduras de los cursos de agua más importantes de la Región, no se observa ocurrencia de la Clase I.

Por otra parte, se observa una mayor concentración de suelos clasificados como Clase II en los valles agrícolas, caso del valle del Elqui en la sección del río del mismo nombre, al Este del embalse Puclaro, así como también en la bahía de la ciudad de La Serena hacia el interior del valle del Elqui, estas últimas correspondientes a terrazas marinas. En el valle del Limarí, estos suelos se encuentran en la zona comprendida por el triángulo encerrado por las localidades de Socos, Salala y Ovalle; por otra parte, en las proximidades del pueblo de Combarbalá, Illapel y especialmente en el valle del río Choapa, en las proximidades del pueblo de Salamanca. Este patrón, de suelos muy aptos para la agricultura en las proximidades de los centros urbanos más importantes de la Región de Coquimbo, habla de la tendencia del hombre por asentarse en los sitios con el mayor potencial agrícola posible, situación que es corroborada en cierta medida por los resultados del presente modelo.

Respecto a la Clase III, esta se encuentra en mayor proporción presente en la superficie de la Región respecto a la Clase II, con un 1,28% de la superficie clasificada (Cuadro 15). En este caso, la distribución de los suelos de esta clase es más uniforme que la Clase II, asociándose principalmente a los suelos ubicados en el área comprendida por las secuencias Sedimentarias. Sin embargo, también se observa la ocurrencia de la Clase III en suelos en posiciones fuera del rango de los fondos de valles, tales como fondos de quebradas

accidentadas dentro de las serranías, y suelos cercanos a las cumbres de cerros, como ocurre en las proximidades de las cimas del Cordón Altos de Talinay, por citar un ejemplo.

Aquí, la Clase III empieza a abarcar los depósitos aluviales y coluviales que son característicos de los suelos de los valles y de las llamadas zonas interiores, muy frecuentes en los valles del Elqui y Limarí (este último incluye los valles del Río Hurtado y Río Grande), así como también en los valles de Choapa e Illapel, caracterizados por considerar suelos aluviales de bajas pendientes en gran proporción (Luzio *et al.*, 2010). De esta forma, estos tipos de depósitos en las zonas interiores y en los valles, han afectado y sido afectados por los ríos, cuyos depósitos determinan la presencia de terrazas que terminan por ser las más aptas para la agricultura.

Clase IV. La Clase de Capacidad de Uso IV se caracteriza por presentar severas limitaciones de uso que restringen la elección de cultivos, tal que para ser cultivados requieren de prácticas de manejo y de conservación muy cuidadosas (Casanova, 2010). Aun cuando pueden presentar otras limitaciones, estos suelos poseen hasta un 25% de pendiente, o bien una profundidad entre 25 y 50 cm (Cuadro 1), las cuales corresponden a las limitaciones más usuales de estos suelos, como lo son las pendientes pronunciadas y los suelos delgados (Casanova, 2010).

La Clase IV, cuya ocurrencia espacial se puede observar en el Apéndice 7, representa el 6,82% de los suelos clasificados de la zona de estudio (Cuadro 15), presentándose en la superficie regional con cierta homogeneidad, con excepción de las serranías, las cuales representan una proporción importante dentro de la Región de Coquimbo. Por otra parte, en el Apéndice 7 se puede observar que en los valles del Elqui, Limarí y Choapa, se hace especialmente evidente que la ocurrencia de la Clase IV ya no se asocia a los fondos de valles, sino a la situación intermedia entre suelos con cierta capacidad para un uso agrícola, con pendientes menores a 25 % y profundidades superiores a 25 cm (Figura 4), y los suelos sin potencial de laboreo, considerados como no arables. Es así que en los valles antes citados, donde los fondos de los valles tienen poca variabilidad en cuanto a pendiente y profundidad, se hace especialmente evidente la ausencia de la Clase IV, resultado que resulta lógico de acuerdo a la clasificación según Capacidad de Uso de suelos propuesta por el USDA (2014).

En este punto, ya empiezan a ser representados en mayor proporción los suelos en posición de abanicos aluviales y conos de deyección coluviales, depósitos propios de los márgenes de los valles de las zonas interiores, que se sobreponen a las terrazas fluviales y marinas, dependiendo del caso.

Clase VI. Con una ocurrencia del orden de 14,15% (Cuadro 15), la Clase VI se puede distinguir en lo que corresponde a situaciones intermedias entre los fondos de valles y las cimas de las serranías (Apéndice 8), en la zona conocida como de montañas medias (Novoa, 1989). Estas se encuentran asociadas a geoformas cuyo factor común es la profundidad esperada de perfil (entre 50 y 100 cm). Este criterio se condice con una posición espacial, donde es más probable encontrar suelos relativamente profundos, pero

con la limitante de la pendiente, lo que determina que estén dentro de la definición de suelos con severas limitaciones, que los hace inadecuados para su cultivo, y que ven limitados su uso fundamentalmente a pasturas, cultivos forestales o para su conservación (Klingebiel y Montgomery, 1961).

Por tratarse de una categoría definida por una profundidad de suelos entre ligeramente profundos (50-75 cm) y moderadamente profundos (75-100 cm) (CIREN, 2005), son suelos con aptitudes para ser utilizados en agricultura, por lo que su distribución también considera zonas categorizadas como terrazas marinas y fluviales, depósitos que al considerar distintos niveles de terrazas, y al haber sido alterados por flujos de masa de origen aluvial y coluvial, generaron pendientes entre 8 y 25% que determinan la ocurrencia de la Clase VI en áreas tales como la bahía de Tongoy y la franja litoral entre La Serena y Los Vilos, entre otros.

Esta categoría se describe en áreas catalogadas como no arables, por lo que integra amplios sectores no clasificados anteriormente, afectados por la geografía abrupta de la Región y por procesos activos de formación de paisaje que aún están moldeando y dando forma a la superficie de la Región de Coquimbo.

Clases VII y VIII. Como se observa en el Cuadro 15, la Clase de Capacidad de Uso que abarca mayor superficie dentro de la región (44,06%), corresponde a la Clase VII. Como se observa en el Apéndice 9, la ocurrencia de esta Clase en la Región se da en las zonas altas de los cordones montañosos, o montañas medias, que la atraviesan en forma transversal en orientación oriente-poniente (Novoa, 1989). En estas zona, como ya se mencionó anteriormente, aparece como un relieve desmembrado y discontinuo, efecto de la disección fluvial (Novoa y López, 2001) con pendientes entre 25 y 50%, dentro del rango de pendientes complejas, como cerros (Cuadro 9). Esta condición del relieve es determinante en la clasificación, pues determina una limitación muy severa, que convierte a los suelos bajo estas condiciones como inadecuados para su cultivo (Klingebiel y Montgomery, 1961). De esta forma, la Clase VII se ha correlacionado con las geoformas “Cañones, arroyos en quebradas profundas” y “cimas de montañas, estribaciones altas” determinadas mediante el TPI, en consecuencia con la definición de esta clase de Capacidad de Uso de suelos (Cuadro 1).

Respecto a la Clase VIII, en el Apéndice 9 se distingue claramente su presencia en la zona de alta montaña, sección más oriental y de mayor altitud de la hoya hidrográfica, que corresponde a la Cordillera de Los Andes (Novoa y López, 2001), cuyas cumbres superan los 3500 msnm, alcanzando los 6000 msnm sobre la frontera con Argentina. Esta zona manifiesta la ocurrencia de actividad glacial, tanto en las laderas como en los valles, cuyas nacientes son los circos glaciares de la cordillera (Cepeda *et al.*, 2008). La marcada influencia de actividad glacial en la formación del paisaje cordillerano, sumado a procesos tectónicos de solevantamiento andino, caso de la Falla de Vicuña, han determinado la existencia de una zona montañosa con pendientes muy altas, en el rango de pendientes de montaña (Cuadro 9). A este factor último factor se le dio un gran peso en el modelo para determinar espacialmente la ocurrencia de la Clase VIII, que por definición comprende a

suelos cuyas limitaciones los excluyen para su uso en producción comercial de plantas (Klingebiel y Montgomery, 1961). Esta Clase considera una proporción importante de superficie regional que no es aprovechable para la agricultura, abarcando 32,03% del área de la Región de Coquimbo.

Ahora bien, también se han descrito suelos Clase VIII en otras posiciones fuera de la alta montaña, tales como las serranías interiores, quebradas dentro de los valle, y en la zona litoral, delimitando claramente en ciertos casos los cajones de las quebradas que desembocan en el mar, caso por ejemplo del río Limarí a la altura del poblado de Angostura, situación que indica un proceso de erosión por el agua que modela el paisaje, que a falta de precipitaciones frecuentes, determina que los flujos de agua socaven profundamente, sin que se alcancen a suavizar los márgenes de las quebradas, a falta de otros procesos físicos erosivos de importancia bajo las condiciones climáticas de la zona.

Suelos no clasificados. Como se puede observar en el Cuadro 14, el 17,8% de la superficie analizada no cae dentro de la regla de decisión experta propuesta en la Figura 4. Esto se debe fundamentalmente a que la regla propuesta se basa en los criterios lógicos propuestos por el USDA (2014), cuantitativos para los factores pendiente y profundidad, que al ser estrictos, no permiten abarcar toda la variabilidad de condiciones que ocurren en la realidad.

Por otra parte, el diseño del esquema de clasificación experta implica generar una clasificación a partir de una serie de variables de entrada, y no clasificar un resultado ya generado, mediante métodos probabilísticos. Esta característica del modelo implica que hay situaciones no contempladas sin clasificar, puesto que las condiciones propuestas en el Cuadro 1 no consideran su existencia.

Ciertamente el hecho de que una parte de las combinaciones posibles entre variables no se encuentren contempladas en el modelo es relevante, más, resulta necesario mirar en detalle aquellas situaciones no clasificadas para determinar la razón de su ocurrencia. En el Cuadro 16 se observan las combinaciones no contempladas en el modelo experto, y la ocurrencia espacial de estas a partir de la cantidad de píxeles asociados a cada una de estas combinaciones.

Cuadro 16. Combinaciones no contempladas en modelo experto de decisión clasificadas como no determinado en el Cuadro 14.

Código	Secuencia	Profundidad	Pendiente	Píxeles	Area	Area	Proporción respecto a superficie regional
		cm	%		m ²	ha	%
110	---	≥ 100	<2	13	11700	1,17	0,0000
112	Intrusiva	≥ 100	<2	346	311400	31,14	0,0008
113	Volcánica-Volcano sedimentaria	≥ 100	<2	107	96300	9,63	0,0002
120	---	≥50 a <100	<2	90	81000	8,10	0,0002
121	Sedimentaria	≥50 a <100	<2	351751	316575900	31657,59	0,8030
122	Intrusiva	≥50 a <100	<2	3590	3231000	323,10	0,0082
123	Volcánica-Volcano sedimentaria	≥50 a <100	<2	1662	1495800	149,58	0,0038
130	---	≥25 a <50	<2	225	202500	20,25	0,0005
131	Sedimentaria	≥25 a <50	<2	75808	68227200	6822,72	0,1731
140	---	<25	<2	232	208800	20,88	0,0005
141	Sedimentaria	<25	<2	45825	41242500	4124,25	0,1046
142	Intrusiva	<25	<2	11011	9909900	990,99	0,0251
143	Volcánica-Volcano sedimentaria	<25	<2	3163	2846700	284,67	0,0072
210	---	≥ 100	≥2 a <5	30	27000	2,70	0,0000
212	Intrusiva	≥ 100	≥2 a <5	1965	1768500	176,85	0,0045
213	Volcánica-Volcano sedimentaria	≥ 100	≥2 a <5	645	580500	58,05	0,0015
220	---	≥50 a <100	≥2 a <5	281	252900	25,29	0,0006
221	Sedimentaria	≥50 a <100	≥2 a <5	309799	278819100	27881,91	0,7072
222	Intrusiva	≥50 a <100	≥2 a <5	14220	12798000	1279,80	0,0325
223	Volcánica-Volcano sedimentaria	≥50 a <100	≥2 a <5	4980	4482000	448,20	0,0114
230	---	≥25 a <50	≥2 a <5	721	648900	64,89	0,0016
231	Sedimentaria	≥25 a <50	≥2 a <5	356414	320772600	32077,26	0,8136
240	---	<25	≥2 a <5	1069	962100	96,21	0,0024
241	Sedimentaria	<25	≥2 a <5	213057	191751300	19175,13	0,4864
242	Intrusiva	<25	≥2 a <5	48301	43470900	4347,09	0,1103
243	Volcánica-Volcano sedimentaria	<25	≥2 a <5	14881	13392900	1339,29	0,0340
310	---	≥ 100	≥5 a <8	89	80100	8,01	0,0002
311	Sedimentaria	≥ 100	≥5 a <8	324327	291894300	29189,43	0,7404
312	Intrusiva	≥ 100	≥5 a <8	5269	4742100	474,21	0,0120
313	Volcánica-Volcano sedimentaria	≥ 100	≥5 a <8	1645	1480500	148,05	0,0038
320	---	≥50 a <100	≥5 a <8	1193	1073700	107,07	0,0027
330	---	≥25 a <50	≥5 a <8	1148	1033200	103,32	0,0026
331	Sedimentaria	≥25 a <50	≥5 a <8	459659	413693100	41369,31	1,0493
340	---	<25	≥5 a <8	2140	1926000	192,60	0,0049
341	Sedimentaria	<25	≥5 a <8	295062	265555800	26555,58	0,6736
342	Intrusiva	<25	≥5 a <8	98021	88218900	8821,89	0,2238
343	Volcánica-Volcano sedimentaria	<25	≥5 a <8	30649	27584100	2758,41	0,0700

Cuadro 16. Continuación.

Código	Secuencia	Profundidad	Pendiente	Píxeles	Area	Area	Proporción respecto a superficie regional
		cm	%		m ²	ha	%
410	---	≥ 100	≥8 a <25	45	40500	4,05	0,0001
411	Sedimentaria	≥ 100	≥8 a <25	77554	69798600	6979,86	0,1770
412	Intrusiva	≥ 100	≥8 a <25	2166	1949400	194,94	0,0049
413	Volcánica-Volcano sedimentaria	≥ 100	≥8 a <25	716	644400	64,44	0,0016
420	---	≥50 a <100	≥8 a <25	26353	23717700	2371,77	0,0602
430	---	≥25 a <50	≥8 a <25	36936	33242400	3324,24	0,0843
431	Sedimentaria	≥25 a <50	≥8 a <25	988102	889291800	88929,18	2,2556
440	---	<25	≥8 a <25	34155	30739500	3073,95	0,0780
441	Sedimentaria	<25	≥8 a <25	956922	861229800	86122,98	2,1844
442	Intrusiva	<25	≥8 a <25	167575	150817500	15081,75	0,3825
443	Volcánica-Volcano sedimentaria	<25	≥8 a <25	620425	558382500	55838,25	1,4163
520	---	≥25 a <50	≥25 a <50	59816	53834400	5383,44	0,1365
530	---	≥25 a <50	≥25 a <50	63829	57446100	5744,61	0,1457
531	Sedimentaria	≥25 a <50	≥25 a <50	95775	86197500	8619,75	0,2186
540	---	<25	≥25 a <50	70489	63440100	6344,01	0,1609
541	Sedimentaria	<25	≥25 a <50	47534	42780600	4278,06	0,1085
620	---	≥25 a <50	≥50	62151	55935900	5593,59	0,1419
630	---	≥25 a <50	≥50	76480	68832000	6883,20	0,1746
631	Sedimentaria	≥25 a <50	≥50	24110	21699000	2169,90	0,0550
640	---	<25	≥50	68821	61938900	6193,89	0,1571
641	Sedimentaria	<25	≥50	20598	18538200	1853,82	0,0470

Como se observa en el Cuadro 16, las unidades no clasificadas en ocasiones responden a situaciones donde falta información, caso de aquellas donde la superficie no tiene asociada una Secuencia Geológica, por tratarse de áreas donde no se determinó la Secuencia geológica por tratarse de fondo (Cuadro 6). De esta forma, estas situaciones particulares son escasas, cuya máxima representación espacial promedio del 0,16% de la superficie regional, para la categoría cuyo código asociado es 540 en el Cuadro 16.

Ahora bien, existen una serie de situaciones no contempladas por el modelo en sentido estricto, pero en su mayoría son de muy baja representatividad espacial, y muy disgregadas en el área de estudio, por lo que no son de relevancia a nivel de superficie regional, considerando la escala de trabajo. Sin embargo, si se toma en cuenta que la Clase I se encuentra representada en un 0,62% de la superficie regional, considerando las unidades no clasificadas (Cuadro 14), existen ciertas combinaciones que sobrepasan este porcentaje, por lo que son relevantes de ser analizadas más detenidamente, cuyos códigos asociados en el Cuadro 16 son los siguientes: 121, 221, 231, 311, 331, 341, 431, 441 y 443. El detalle de estas categorías se puede observar en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Combinaciones no contempladas en modelo experto de decisión clasificadas como no determinado con una ocurrencia espacial superior a 0,62% en la Región de Coquimbo.

Código	Secuencia Geológica	Profundidad	Pendiente	Píxeles	Area	Area	Proporción respecto a superficie regional	
		cm	%		m ²	ha	%	
121	Sedimentaria	≥50 a <100	<2	351751	316575900	31657,59	0,80	
221	Sedimentaria	≥50 a <100	≥2 a <5	309799	278819100	27881,91	0,71	
231	Sedimentaria	≥25 a <50	≥2 a <5	356414	320772600	32077,26	0,81	
311	Sedimentaria	≥100	≥5 a <8	324327	291894300	29189,43	0,74	
331	Sedimentaria	≥25 a <50	≥5 a <8	459659	413693100	41369,31	1,05	
341	Sedimentaria	<25	≥5 a <8	295062	265555800	26555,58	0,67	
431	Sedimentaria	≥25 a <50	≥8 a <25	988102	889291800	88929,18	2,26	
441	Sedimentaria	<25	≥8 a <25	956922	861229800	86122,98	2,18	
443	Volcánica-Volcano sedimentaria	<25	≥8 a <25	620425	558382500	55838,25	1,42	
Total					4662461	4196214900	387544,23	10,64

Como se puede apreciar en el Cuadro 17, el total representado por estas unidades, en cuanto a superficie comprendida dentro del área de estudio, es del orden del 10,64%.

Al ver en detalle las unidades consideradas en el Cuadro 17, se aprecia que las combinaciones de secuencia, profundidad y pendiente son posibles en la realidad, pero dada la rigidez de las reglas propuestas en el modelo de decisión experta, no son contempladas. Por ejemplo, la categoría cuyo código asociado es 121, ocurre ya que para suelos con pendientes menores a 2%, se asocian geoformas clasificadas como planos únicamente, y por tanto a suelos con más de 100 cm de profundidad, siendo que pueden darse en otras geoformas definidas por Weiss (2001), lo que hace pensar que las geoformas tienen una variabilidad intrínseca mayor a lo considerado en el modelo. Mismo caso ocurre con la categoría 221, que con pendientes entre 2 y 5% fueron asociadas únicamente a planos, y por tanto a suelos con profundidades mayores a 100 cm, por citar otro caso.

Por otra parte, las categorías 341, 441 y 443 consideran suelos en las Geoformas Cimas de montañas y estribaciones altas, las cuales se asociaron a suelos con profundidades menores a 25 cm, pero que en ciertas condiciones ocurren en posiciones de pendientes menores a 8%, situación no contemplada en el modelo de decisión experta, pese a la Geoforma a las que se encuentran asociadas.

Dadas estas consideraciones, se determinó asociar las categorías detalladas en el Cuadro 17 a rangos de Clases de Capacidad de Uso de suelos, que con menor precisión que una categoría en particular, no significa una reestructuración del modelo experto, armado en base a condiciones determinadas y basadas en la propuesta elaborada por el USDA (2104), que aún tiene la capacidad de clasificar el 82,20% de la superficie estudiada. De esta manera, la reclasificación de las categorías en el Cuadro 17 se detalla en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Reclasificación categorías no clasificadas por regla de decisión experta por rangos de Clases de Capacidad de Uso.

Código	Secuencia Geológica	Profundidad	Pendiente	Rango de Clases de
				Capacidad de Uso asignadas
		cm	%	
121	Sedimentaria	≥50 a <100	<2	Clases I a IV
221	Sedimentaria	≥50 a <100	≥2 a <5	Clases I a IV
231	Sedimentaria	≥25 a <50	≥2 a <5	Clases I a IV
311	Sedimentaria	≥ 100	≥5 a <8	Clases I a IV
331	Sedimentaria	≥25 a <50	≥5 a <8	Clases I a IV
341	Sedimentaria	<25	≥5 a <8	Clases VI a VIII
431	Sedimentaria	≥25 a <50	≥8 a <25	Clases I a IV
441	Sedimentaria	<25	≥8 a <25	Clases VI a VIII
443	Volcánica-Volcano sedimentaria	<25	≥8 a <25	Clases VI a VIII

De esta forma, modificando los resultados informados en el Cuadro 14 a partir de una nueva reclasificación, considerando las categorías detalladas en el Cuadro 18, teniendo en cuenta que faltan mayores antecedentes, se obtiene un resultado complementario y con menos cantidad de píxeles sin clasificar en la superficie regional, como se puede apreciar en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Información de clasificación de superficies resultado de aplicación de modelo experto de decisión, complementado con reclasificación de algunas de las unidades no consideradas en esquema de la Figura 4.

Capacidad de laboreo	Clase Capacidad de Uso	pixeles	Área (m ²)	Área (ha)	Área (%)	Representatividad según capacidad de laboreo (%)
Arable	Clase I	270421	243378900	24337,89	0,62	14,63
	Clase II	325870	293283000	29328,30	0,74	
	Clase III	459693	413723700	41372,37	1,05	
	Clase IV	2455308	2209777200	220977,72	5,60	
	Clases I a IV	2896643	2606978700	260697,87	6,61	
No arable	Clase VI	5096764	4587087600	458708,76	11,63	78,46
	Clase VII	15866913	14280221700	1428022,17	36,22	
	Clase VIII	11534176	10380758400	1038075,84	26,33	
	Clases VI a VIII	1872409	1685168100	168516,81	4,27	
---	No clasificado	3028361	2725524900	272552,49	6,91	6,91

El detalle de la ocurrencia espacial de las categorías Clases I a IV y Clases VI a VIII se pueden apreciar en el Apéndice 10.

Validación de resultados

La validación tiene por objeto realizar una comparación entre la clasificación de los suelos caracterizados a distancia, generada a partir del modelo desarrollado, y la realidad *in situ* de estos.

El modelo de clasificación fue generado a partir del conocimiento experto, en base a un sistema de clasificación ampliamente utilizado correspondiente a las Clases de Capacidad de Uso de suelos, propuestas por el USDA (2014). De esta forma, el sistema de clasificación se interpretó y reorganizó, en base a la información disponible, la naturaleza de esta y el criterio experto que aglutinó todos estos factores para generar el sistema de clasificación. Posteriormente, en orden a complementar el resultado con fuentes de información equivalentes, se consultó a un experto en el ámbito de la Ciencia del suelo para el proceso de validación del modelo, uno con conocimiento y experiencia en el sistema de clasificación del USDA para Clases de Capacidad de Uso de suelos.

La consulta al experto consistió en comparar los resultados, obtenidos mediante el modelo experto de decisión, con información detallada levantada en terreno para una serie de puntos, a modo de controles. La información comprendió descripciones completas desde el punto de vista físico-químico, junto con descripciones de perfiles de suelos, a partir de las cuales el experto consultado clasificó los puntos evaluados según Clases de Capacidad de Uso.

El detalle de la ocurrencia espacial de los puntos de control se puede observar en el Apéndice 11, donde se aprecia el resultado de la clasificación experta modificada, la cual incluye las unidades reclasificadas, detalladas anteriormente en el Cuadro 18.

En el Apéndice 11 se observa que los puntos de control evaluados se encuentran en zonas pertenecientes al litoral, con excepción del punto catalogado como Las Cardas, que aun así se ubica en la zona de influencia marina. Esta situación impide poder comparar los resultados obtenidos para zonas interiores nunca antes clasificadas, con datos reales levantados por descripciones en terreno. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que no fue posible contar con información de descripciones de suelos para estas zonas interiores, al menos no con la precisión necesaria para poder clasificarlas propiamente según Clases de Capacidad de Uso.

Los puntos de control evaluados, pese a ser pocos y a ubicarse en las proximidades zonas de relevancia agrícola, son particulares en cuanto comprenden una descripción completa de sus características desde un punto de vista descriptivo y analítico, lo que permitió al experto emitir un juicio informado respecto a su clasificación.

La validación propuesta busca evaluar no únicamente los resultados de la clasificación generada mediante el modelo experto, sino también el modelo en sí, en cuanto su capacidad de generar una clasificación con la información disponible, teniendo en cuenta sus limitaciones y potencialidades.

El detalle los puntos de control evaluados, incluyendo Clase predicha por el modelo y Clase determinada por el experto, se puede apreciar en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Puntos de control evaluados para validación de resultados, con correspondientes Clases de Capacidad de Uso predichas por el modelo experto de decisión y Clases de Capacidad de Uso determinada por el experto consultado.

Punto	Denominación punto según poblado de referencia	Fuente	Coordenadas UTM		Clase Capacidad de uso definida por experto consultado	Clase de Capacidad de Uso obtenida por modelo de clasificación experta	Correspondencia
			E	N			
1	Canela	Muñoz (2014)	256175	6517937	IV	Clases VI a VIII	No
2	Las Cardas	Aburto et al. (2008)	282598	6653195	III-IV	Clases I a IV	Sí
3	Tongoy	Aburto et al. (2008)	261291	6648054	VII	Clases VI a VIII	Sí
4	Huentelauquén	Aburto et al. (2008)	259930	6504135	VI	IV	No
5	Los Vilos	Aburto et al. (2008)	263342	6477586	VI	VI	Sí
6	San Julián	Aburto et al. (2008)	271763	6603958	IV	no determinado	No
7	Maitencillo (bahía Tongoy)	Pfeiffer et al. (2012)	264847	6636763	VI	no determinado	No

Como se observa en el Cuadro 20, en 3 de los 7 casos evaluados la clasificación generada por el modelo concuerda con la determinada por el experto consultado, lo que indicaría un grado de inexactitud sobre 50% por parte del modelo. Sin embargo, hay 3 casos que es necesario evaluar con mayor detalle, que son los casos de los puntos de San Julián, Maitencillo y Huentelauquén.

En el caso de los puntos de control San Julián y Maitencillo, su ubicación ha correspondido a zonas clasificadas por el modelo experto como no determinado, zonas que, como se explicó anteriormente, se ubican en una condición donde la combinación de posición de pendiente, geoforma y Secuencia geológica, no se encuentra considerada por el sistema de clasificación según Clase de Capacidad de Uso. Como ya se determinó anteriormente, esto último ocurre ya que es poco probable que aquellas combinaciones de variables se den en el paisaje, si se ve el detalle de la combinación de factores que se dan para cada caso (Cuadro 17).

En el caso del punto de control San Julián, este se ubica en una posición con pendiente entre 2 y 5%, sobre una Secuencia Geológica Sedimentaria y con una profundidad de perfil inferior a los 25 cm. Esta combinación, cuyo código asignado en el Cuadro 16 es 241, ocurre solo en 1,48% de la superficie regional, lo que indica que se trata de una situación particular poco probable. Para el caso del punto de control Maitencillo, en el Cuadro 16 se observa que representa una combinación de factores que solo ocupa 0,38% del área de estudio (código 442, Cuadro 16), lo que reafirma su baja probabilidad de ocurrencia.

Las unidades no determinadas, que ocupan un 6,91% de la superficie regional (Cuadro 19), dado que corresponden a unidades cuya representatividad espacial es inferior a 0,62% para

cada combinación en particular, pueden ser consideradas como inclusiones, en cuanto son situaciones particulares y puntuales dentro de contextos distintos. En mapas de series de suelos usualmente se trabaja con una uniformidad en los muestreos del orden del 85%, es decir, con menos de un 15 % de la superficie ocupada por inclusiones (Soil Survey Staff, 2010). Finke *et al.* (1999), en la base de datos georeferenciada para Europa, informa que las purezas de las unidades cartográficas varían entre el 65% y 70%, de manera que el 6,91% de inclusiones obtenidas a partir de la ejecución del modelo de clasificación experta cae dentro del rango tolerable para efectos de un estudio de suelos.

Relativo al punto de control descrito en Huentelauquén, este fue clasificado como Clase VI por el experto consultado, considerando un suelo con alto contenidos de sodio en el perfil (Aburto *et al.*, 2008), lo que afecta la estabilidad estructural del suelo y limita el establecimiento de especies de interés agrícola, esto último debido al pH alcalino del suelo. Esta última situación podría revertirse si el suelo en cuestión se habilitara por medio de un lavado y/o aplicación de enmiendas de yeso (sulfato cálcico) para reducir el pH y controlar la salinidad. En base a esta consideración, por limitantes de carácter químico de los suelos que pueden ser revertidos mediante manejo, muchas condiciones particulares de suelo caen en una categoría de Clase de Capacidad de Uso inadecuada para fines agrícolas, que pueden ser fácilmente modificables, a diferencia de otros factores limitantes tales como pendientes altas y suelos poco profundos.

Como se puede observar, el modelo considera una amplia superficie donde existe una amplia variabilidad en los suelos debida a factores de la más diversa índole, desde limitantes por presencia de estratas impermeables, hasta limitantes de carácter químicas por exceso de sales disueltas. Sin embargo, el método propuesto no pretende lograr ese nivel de precisión, si no generar una clasificación que permita dar una aproximación de la potencialidad de los suelos a una escala espacial de 1:250.000, la cual se encuentra supeditada a los posibles manejos de habilitación que se puedan efectuar en ellos.

El modelo propuesto en el presente trabajo es capaz de predecir Clases de Capacidad de Usos de suelo, tal que al ver el detalle de la información asociada a cada situación en particular, se permite una lectura más precisa de las potencialidades de los suelos a nivel de Geología y Clases texturales, Relieve y Geoformas, y Clima, generando un marco que define el tipo de suelos esperados para cada condición, cosa bastante útil para zonas donde la información de suelos es inexistente. Tal es el caso de los puntos San Julián y Maitencillo, que si bien corresponden a inclusiones, la interpretación de los parámetros que los definen son útiles para estimar sus potencialidades; mismo caso con el punto Huentelauquén, que si bien es Clase VI según el experto consultado, tiene potencial de ser un Clase IV si se realiza un manejo de suelos adecuado.

DISCUSIÓN

Los modelos basados en el conocimiento experto debe cumplir con los siguientes propósitos (Dijkerman, 1974): observacional, experimental, descriptivo, explicativo, predictivo, escalar, idealizado y análogo.

El modelo generado, dada la naturaleza del estudio, no cumple con la condición de ser observacional, puesto que la información utilizada ha sido obtenida en forma remota y no *in situ*. Este aspecto del estudio es de importancia a la hora de establecer la capacidad predictiva del mismo, que se encuentra limitada por la naturaleza de la información utilizada para su ejecución. De esta forma, la escala de trabajo a utilizar es de gran importancia, en cuanto limita la capacidad predictiva del modelo a una magnitud de utilidad según el propósito que se persigue, que en este caso es predecir las Clases de Capacidad de Uso de los suelos para la superficie de la Región de Coquimbo.

La escala de trabajo utilizada en el presente trabajo, que es del orden de 1:250.000, exige contar con un volumen de información suficiente para poder lograr ese nivel de detalle. En este sentido, el TPI utilizado para determinar las geoformas del paisaje contó con un nivel de detalle capaz de diferenciar unidades en el paisaje en un área promedio entre los 60 metros del SN y los 120 metros de LN. En este sentido, la resolución utilizada excedió el propósito del estudio por razones anteriormente explicadas, independientes de la consideración de la escala de trabajo. Esto permitió contar con información muy detallada, que resultó de gran utilidad para definir los parámetros pendiente y profundidad del perfil, ambos derivados de las geoformas.

Respecto de las Geoformas, si bien no fueron utilizadas en el modelo experto en forma directa, permitieron establecer en forma indirecta el parámetro de “profundidad a la capa lítica o para-lítica” (Cuadro 1). En cuanto a esto último, la correlación hecha entre las geoformas y las profundidades se basa en rangos muy gruesos que no permiten distinguir la variabilidad espacial de la zona de estudio, la cual presenta un sinnúmero de situaciones donde se puede dar la presencia de una estrata limitante en el perfil, que reduce la profundidad esperada para un suelo en posición de baja pendiente, como por ejemplo los suelos con “tertel” descritos en los alrededores de la bahía de Tongoy, entre terrazas litorales del batolito costero (Luzio *et al.*, 2010). Respecto al mismo punto, existen muchas condiciones particulares descritas en estudios anteriores, que informan de variaciones locales en las profundidades del perfil. En este sentido, la deducción de las profundidades a partir de las geoformas es espacialmente poco precisa; sin embargo, la aproximación indirecta realizada puede resultar acorde para fines de una clasificación de carácter general, junto a otros parámetros, pero no como fuente para definir profundidades de suelo por sí sola.

Respecto al factor material parental, utilizado para determinar indirectamente las texturas de suelo, se constituyó como el predictor menos preciso en el esquema del modelo, al no poder ser posible diferenciar en el espacio las unidades geológicas detalladas en el mapa geológico (Apéndice 1). Esta situación fue inesperada, evidenciándose en la fase de generación de insumos para el modelo, lo que significó una deficiencia en la implementación de este último. Sin embargo, como se aprecia en el Cuadro 1, las clases de texturas de suelo que definen a las Clases de Capacidad de Uso I y II abarcan un espectro muy amplio y poco acotado, lo que hizo aún más difícil diferenciarlas de las Clases III y IV, cuyas texturas se hayan incluidas dentro del espectro posible que abarcan las primeras. Puesto que estos criterios se repiten para las Clases de tipo no arable, la dificultad radicó en diferenciar las Clases de Capacidad de Uso cuyas texturas se encontraron en un rango más acotado, caso de la Clase III (clase textural arcillosa). Esta situación, sumado al hecho de que las Secuencias geológicas Volcánica y Volcánica-Sedimentaria tienen mayor probabilidad de presentar texturas arcillosas (Apéndice 1) respecto de las secuencias restantes, permitió determinar este tipo de texturas a nivel de Secuencias geológicas. De esta forma, la ocurrencia de texturas arcillosas fue utilizada para diferenciar a la Clase II, para áreas con pendientes entre 5 y 8%, lo que contradice el criterio del USDA (Cuadro 1). En este caso particular, lo que primó fue el criterio experto, donde la erodabilidad potencial de un suelo en situación de pendiente se consideró menor al presentar una textura arcillosa, en comparación a un suelo, bajo las mismas condiciones de pendiente, con texturas más gruesas, siendo este último clasificado como Clase III. De esta forma, es importante tener en cuenta que la clasificación propuesta por el USDA (2014), tiene el carácter de sugerencia, siendo modificable según la interpretación y contexto en el cual se aplique.

Otro punto que significó una dificultad en el proceso de generación de insumos para el modelo, fue la clasificación del Clima. Como se pudo observar en el Cuadro 13, los valores para los parámetros ETo, PM y TMM resultaron encontrarse en rangos donde el modelo de clasificación según Regímenes de Humedad de Jarauta (1989) no logró distinguir diferencias, clasificando a toda la Región de Coquimbo bajo el Régimen Árido. Respecto a este punto, la decisión de usar el modelo de Jarauta respondió a la necesidad de definir Regímenes de humedad para satisfacer los requerimientos de la clasificación propuesta por el USDA (2014). Sin embargo, esta clasificación resultó ser poco sensible a la variabilidad climática regional, lo que implicó una generalización gruesa del Clima regional. Esto último indica la necesidad de establecer un modelo más sensible a la variabilidad espacial de los factores que definen el Clima, considerando que es un factor de formación de suelos (Jenny, 1941) y como tal, tiene gran influencia sobre la formación de suelos por el control ejercido no solo sobre algunas de las reacciones químicas y físicas que tienen lugar en los suelos (Retallack, 2001), sino también por su control sobre el factor orgánico, los relieves y el tiempo, mediante la erosión y el depósito de materiales (Favis *et al.*, 1996). Si bien la escala de trabajo del presente estudio no es de un nivel fino de detalle, estas consideraciones reafirman la necesidad de lograr precisión en la diferenciación climática de una zona tan extensa y variada en relieve, como lo es la Región de Coquimbo.

Existen una serie de parámetros que no fueron aplicados en el modelo de clasificación experto detallado en la Figura 4, y que son relevantes para la determinación de condiciones

limitantes de suelo. Entre estos parámetros se pueden mencionar el drenaje, la pedregosidad superficial, el agua aprovechable, la salinidad, sodicidad y alcalinidad, entre otros (Freres, 2001), los cuales son habitualmente utilizados para clasificar suelos según Capacidad de Uso. De esta manera, resulta evidente la incapacidad del modelo propuesto de predecir propiedades intrínsecas del suelo, tanto de carácter físico, químico y biológico. Esto se debió a la naturaleza los insumos utilizados para predecir características de suelos, referidas especialmente a las imágenes satelitales y al DEM utilizado, obtenidos de forma remota; sin embargo, estos últimos son de fácil obtención, solo siendo necesario contar con una conexión de internet de mediana capacidad para poder ser descargados para su uso. Esta última condición determinó la elección de utilizar la información obtenida mediante el satélite Landsat 7 ETM+ y (EOS) AM-1, información que al ser de carácter gratuito y de fácil acceso, facilitará, eventualmente, la aplicación del modelo generado a otras zonas y contextos territoriales.

CONCLUSIONES

El modelo de clasificación experta generado permitió clasificar los suelos de la Región de Coquimbo según Clase de Capacidad de Uso de suelos, esto con información obtenida en forma remota de suelos, llámense imágenes satelitales y modelos de elevación digital. Esta información, complementada con las Secuencias Geológicas descritas para la zona de estudio, permitió realizar una aproximación satisfactoria de las características de suelo requeridas para ejecutar la clasificación de los suelos para un 93,6% de la superficie evaluada. Sin considerar las zonas con nubosidad, cuerpos de agua y algunas zonas con nieve cordilleranas, el 6,91% no clasificado se consideró como inclusiones, dentro de los rangos tolerables para estudios de suelo.

La metodología de mapeo abarcó una superficie considerable de la zona de estudio, siendo capaz de detectar situaciones particulares en todos los contextos espaciales evaluados, la mayoría de ellos al margen de estudios afines realizados anteriormente, lo que puede resultar de utilidad para efectos de futuros estudios a realizar en la Región de Coquimbo dirigidos a determinar los distintos potenciales de los suelos de la zona, tanto para fines productivos como de conservación. De esta forma, al considerar la escala de trabajo 1:250.000 utilizada, el modelo no es capaz de detectar posibles limitantes, como por ejemplo estratas impermeables y afloramientos rocosos para las clases arables, ni depresiones con drenaje confinado en posición de media montaña y alta montaña para las clase no arables (correspondientes a humedales de altura).

Para mejorar la precisión del mapa, es necesario contar con información más detallada de clases texturales, lo que implica hacer uso de la percepción remota para distinguir en forma directa la naturaleza de los materiales que se encuentran en la superficie terrestre, e idealmente también a nivel sub-superficial, para correlacionarlos con texturas posibles de suelos.

El criterio de clasificación según Regímenes de Humedad resulta muy generalista, impidiendo captar una variabilidad climática, que a nivel de microclima, puede incidir significativamente en la formación de los suelos, razón por la cual es necesario generar un sistema de clasificación para Capacidades de Uso de suelos que considere esta condición del territorio.

Respecto de la información utilizada, el punto más débil del modelo fue la falta de información complementaria para definir las Capacidades de Uso de suelo. Esto se debió a la incapacidad de predecir las propiedades intrínsecas del perfil a partir de la información de carácter remoto con que se contó. En este sentido, una opción sería realizar muestreos de suelos en terreno, complementarios a la utilización de información satelital, lo que implicaría hacer un estudio ya no de carácter remoto.

En cuanto al relieve, este factor tuvo especial injerencia en la distribución de las Clases, aspecto que lo convierte en un resultado de fácil entendimiento e interpretación, sin necesidad de contar con conocimientos acabados respecto a aspectos edafológicos.

Finalmente, resulta necesario validar los resultados obtenidos por medio de mediciones en terreno y toma de muestras de suelo para determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos, los cuales no fueron incluidos en el modelo generado. Realizada esta validación, será posible afinar la escala de mapeo, y con ello incluir gran parte de las inclusiones cuyas características no fueron contempladas dentro de las combinaciones utilizadas para ejecutar la clasificación según Clases de Capacidad de Uso de suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aburto, F.; C. Hernández; M. Pfeiffer; M. Casanova and Luzio, W. 2008. Soil: a work of art of nature. Northern field guide between 30 S° and 33 S°. In: The international conference and field workshop on soil classification (8 al 18 de Noviembre de 2008). Casanova, M. y W. Luzio (eds). Ovalle, Chile. 94 p.
- Allen, R.; L. Pereira; D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma, Italia: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 6541 p. (Serie publicaciones N° 300).
- Bäuerle, M.; M. Märker; J. González; C. Correa y G. Rodolfi. 2010, nov. Evaluación de la amenaza natural en ambiente semiárido, sustentada en la geomorfología y el modelamiento de índices topográficos. Salamanca, Región de Coquimbo, Chile. *Investigaciones Geográficas*, 42: 19-36.
- Birkeland, P. 1999. Soils and geomorphology. 3a ed. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press. 429p.
- Brunsdon, M. 1996. The persistence of landforms. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 93: 13-28.
- Bui, E. 2004, may. Soil survey as a knowledge system. *Geoderma*, 120 (1): 17-26.
- Burrough, P. and R. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press. 327 p.
- Casanova, M. 2010. Estudios de suelos. [En línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 29 p. Recuperado en: < http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-03_08-37-41104056.pdf> Consultado el: 25 de Marzo de 2014.
- Casanova, M.; O. Salazar; O. Seguel and W. Luzio. 2013. The soils of Chile. New York, USA: Springer Dordrecht Heidelberg. 185p.
- Castillo, Y. 2007. Detección de cambios en la vegetación mediante percepción remota: sitio Cordon Cantillana, RM. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 60 p.
- Castro, J.; M. Delgado and C. Mantas. 2000. MORSE: a general model to represent structured knowledge. *International Journal of Intelligent Systems*, 15 (1): 27– 43.

Cepeda, J.; R. Cabezas; M. Robles y H. Zavala. 2008. Antecedentes generales de la cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile). (pp. 13-37). En: Cepeda, J. Los sistemas naturales de la cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): vulnerabilidad y cambio del clima. La Serena, Chile: Universidad de La Serena. 369 p.

Chander, G.; B. Markham, and D. Helder. 2009, ene. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903.

Chuvieco, E. 2008. Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio. 3a ed. Barcelona, España: Ariel Ciencia. 594 p.

Cihlar, J.; Q. Xiao; J. Chen; J. Beaubien; K. Fung and Ltifovic, R. 1998. Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (14): 2685-2704.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 2005. Estudio Agrológico IV Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Santiago, Chile: CIREN. 300 p. (Series CIREN N°129).

Cohen, P. 1985. Heuristic Reasoning about Uncertainty: An Artificial Intelligence Approach. Marshfield, USA: Pitman Publishing. 204 p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal), Gobierno Regional Cuarta Región de Coquimbo, Universidad Austral de Chile, Universidad de La Serena. 2004. Catastro de uso del suelo y vegetación Cuarta Región de Coquimbo. La Serena, Chile: CONAF. 32 p.

Cook, S.; R. Corner; G. Grealish; P. Gessler and C. Chartres. 1996, nov. A rule-based system to map soil properties. *Soil Science Society America Journal*, 60: 1893–1900.

Corner, R.; R. Hickey and S. Cook. 2002, oct. Knowledge-based soil attribute mapping in GIS: The Expecter method. *Transactions in GIS*, 6 (4): 383–402.

Dale, M.; A. McBratney and J. Russell. 1989, jun. On the role of expert systems and numerical taxonomy in soil classification. *Journal of Soil Science*, 40 (2): 223– 234.

Dijkerman, J. 1974, mar. Pedology as a science: the role of data, models and theories in the study of natural soil systems. *Geoderma*, 11 (2): 73–93.

Dikau, R. 1993. Geographical information systems as tools in geomorphological base map. *Zeitschrift fur Geomorphologie supplementband*, 92: 231-239.

Dokuchaev, V. 1899. Report to the Transcaucasian Statistical Committee on Soil Taxonomy in General and Especially for the Transcaucasia. Horizontal and Vertical Soil

Zones. Tiflis, Rusia: Office Press of the Civilian Affairs, Commander in Chief in the Caucasus. 19 p.

ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2014. Ayuda de ArcGIS 10.1. [En línea]. ESRI. Recuperado en: <<http://resources.arcgis.com/en/help/>> Consultado el: 24 de Septiembre de 2014.

Evans, D.; W. Sammis and D. Cable. 1981. Actual evapotranspiration under desert conditions. *US IBP Synthesis Series*: 195–218.

Farías, E. 2009. Cambio en las propiedades físicas de un suelo en laderas de cultivos con vid (*vitis vinifera*). Memoria Ingeniero Agrónomo, mención Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 40 p.

Favis, D.; J. Quinton and W. Dickinson. 1996, sep. The GCTE validation of soil erosion models for global change studies. *Journal of Soil & Water Conservation*, 51 (5): 397-403.

Ferrando, F. 2002. Cuenca del Rio Limarí, Chile Semiarido: Aspectos de la oferta y demanda de agua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 30: 23-44.

Finke, P.; R. Dudal y R. Hartwich. 1999. Una base de datos de suelos georeferenciada para Europa: manual de procedimientos versión 1.1. Roma, Italia: Comité Científico del Buro Europeo de Suelos. 206 p.

Finke, P. and J. Hutson. 2008, jun. Modelling soil genesis in calcareous loess. *Geoderma*, 145(3): 462-479.

Frank, A. 2003, nov. Evapotranspiration from northern semiarid grasslands. *Agronomy Journal*, 95:1504–1509.

Freres, R. 2001. Pauta para Estudio de Suelos. Santiago, Chile: SAG (Servicio Agrícola y Ganadero), Departamento de Protección Recursos Naturales Renovables. 26 p.

Franklin, J. 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modeling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 19 (4): 474–499.

Fuentes, J. 2005. Guía de apoyo 1 para profesores: la formación del suelo. Proyecto EXPLORA-CONICYT (ED9/04/076). Santiago, Chile: Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 26 p.

Gasco, J. e Ibañez, V. 1979. Criterios para la estimación del régimen de humedad de los suelos. *Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias*, 6: 61-76. (Serie General).

Genchi, S.; M. Carbone; M. Piccolo y G. Perillo. 2011, may. Clasificación geomorfológica automatizada en terrazas del Noreste del Macizo Norpatagónico, Argentina. *GeoFocus*, 11: 182-206.

Gharachelo, S. y S. K. Alavipanah. 2010. The study of geomorphological units using landscape and photographic unit. In: FIG Congress 2010 (11 al 16 de Abril de 2010, Sydney, Australia). Trabajo presentado como ponencia. Sydney, Australia. 7 p.

Goodrich, D.; R. Scott; J. Qi; B. Goff; C. Unkrich; M. Moran *et al.* 2000, nov. Seasonal estimates of riparian evapotranspiration using remote and in-situ measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105 (1): 281–309.

Helms, D. 1992. The Development of the Land Capability Classification. *Readings in the History of the Soil Conservation Service*: 60-73.

Hewitt, A. 1993. Predictive modelling in soil survey. *Soils and Fertilizers*, 56 (3): 305–314.

Huggett, R. 1975, feb. Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, 13 (1): 1–22.

Ibañez, V. y J. Gasco. 1983. Modificaciones al modelo matemático propuesto por Newhall F. para la estimación del régimen de humedad del suelo. España: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. 27 p. (Serie Recursos Naturales INIA N°18).

IREN (Instituto Recursos Naturales), Chile. 1961. Tabulación de la clasificación Capacidad de Uso de la tierra por Provincias y Comunas. Santiago: IREN. 28p.

Jarauta, E. 1989. Modelos matemáticos del régimen de humedad de los suelos. Aplicación a la determinación del régimen de humedad de los suelos del área meridional de Lleida. España, Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya. 181 p.

Jenness, J. 2006. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v1.3a. [En línea]. Jenness Enterprises. 42 p. Recuperado en: <<http://www.jennessent.com/ar-cview/tpi.htm>> Consultado el: 2 de Agosto de 2013.

Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. New York, USA: McGraw-Hill.

Jenny, H., 1961, sep. Derivation of state factor equations of soils and ecosystems. *Soil Science Society of American journal*, 25 (5): 385–388.

Klingebiel, A. and P. Montgomery. 1961. Land-capability classification. Washington, USA: Soil Conservation Service, US Department of Agriculture. 21 p. (Serie General N°210).

Lau, I. 2004. Regolith Landform and mineralogical mapping of the white dam prospect, eastern Olary Domain, South Australia, using integrated remote sensing and spectral techniques. Adelaide, Australia: University of Adelaide. 457p.

Luzio W; M. Casanova y O. Seguel. 2010. Suelos de Chile. Santiago: Universidad de Chile. 346 p.

Mata-González, R; T. McLendon and D. Martin. 2005, feb. The inappropriate use of crop transpiration coefficients (Kc) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: a review. *Arid Land Research and Management*, 19(3): 285-295.

Mausbach, M. and L. Wilding. 1991. Spatial variabilities in soils and landscapes. Madison, USA: Soil Science Society of America. (Publicación especial N°28).

McBratney, A.; M. Mendonça Santos and B. Minasny. 2003, nov. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1): 3-52.

McCracken, R. y R. Cate. 1986, may. Artificial intelligence, cognitive science, and measurement theory applied in soil classification. *Soil Society of America Journal*, 50 (3): 557-561.

Menke, C. 2007. Development of an enhanced gap-filling algorithm for Landsat 7 SLC-off data. *Bachelorarbeit im Studiengang Angewandte Informatik*, 52.

Minasny, B.; A. McBratney and S. Salvador-Blanes. 2008, mar. Quantitative models for pedogenesis —a review. *Geoderma*, 144 (1): 140-157.

Muñoz, F. 2014. Reconstitución de perfiles de suelos erosionados en laderas con distinta exposición en la Región de Coquimbo, Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo, mención Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 50 p.

Newhall, F. 1976. Calculation of the moisture regimes from the climatic record. Washington, USA: Soil Conservation Service.

Novoa, J. 1989. Geografía y Medio Ambiente (pp. 15-20). En: Universidad de La Serena y Universidad Católica del Norte. Colosos del Norte Verde. La Serena, Chile: Universidad de La Serena y Universidad Católica del Norte. 122 p.

Novoa J. 2001. Cambio climático global y pedogénesis en ambientes áridos. *Revista de Geografía Estudios Socioterritoriales*, 2 (2): 93-120.

Novoa, J. y D. López. 2001. IV Región: el escenario geográfico físico (pp. 13-28). En: Squeo, F; G. Arancio y J. Gutiérrez. Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios

para su conservación: Región de Coquimbo. La Serena, Chile: Universidad de La Serena. 372 p.

Or, D. and D. Groeneveld. 1994, mar. Stochastic estimation of plant available soil water under fluctuating water table depths. *Journal of Hydrology*, 163 (1): 43–64.

Oyarzún, J.; H. Maturana; A. Paulo and A. Pasiieczna. 2003. Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): Effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid basin. *Minewater and the Environment*, 22: 155-161.

Paskoff, R. 1970. Le Chili Semiaride. Bordeaux, Francia: Biscaye Freres. 422 p.

Paskoff, R. 1993. Geomorfología de Chile Semiárido. La Serena, Chile: Universidad de La Serena. 321 p.

Pfeiffer, M.; F. Aburto; J. Le Roux; H. Kemnitz; S. Sedov; E. Solleiro-Rebolledo *et al.* 2012, may. Development of a Pleistocene calcrete over a sequence of marine terraces at Tongoy (north-central Chile) and its paleoenvironmental implications. *Catena*, 97: 104-118.

Porta, J.; M. López-Acevedo y C. Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3a ed. Madrid, España: Mundi-Prensa. 960 p.

Rasemann, S.; J. Schmidt; L. Schrott and R. Dikau. 2004. Geomorphometry in mountain terrain (pp. 101-145). In: Bishop, M. and J. Shroder (eds). *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*. Berlin, Alemania: Springer Verlag. 486 p.

Retallack, G. 2001. *Soils of the Past. An Introduction to Paleopedology*. Segunda Edición. Oxford, Inglaterra: Blackwell Science. 520p.

Robinove, C. 1981. The logic of multispectral classification and mapping the land. *Remote Sensing Scientist*, 11: 231-244.

Rovira, A. 1984. *Geografía de los Suelos*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar. (Colección Geografía de Chile).

Rozov, N. and Y. Ivanova. 1967. Classification of the soils of the U.S.S.R. *Soviet Soil Science*, 3: 288-300.

Salvador-Blanes, S.; B. Minasny and A. McBratney. 2007, dic. Modelling long-term *in situ* soil profile evolution: application to the genesis of soil profiles containing stone layers. *European Journal of Soil Science*, 58(6): 1535-1548.

Scull, P.; J. Franklin; O. Chadwick and D. McArthur. 2003, jun. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, 27(2): 171-197.

SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería), Chile. 2003. Mapa Geológico de Chile. Santiago: SERNAGEOMIN. 25 p. (Publicación Geológica Digital N°4).

Skidmore, A.; P. Ryan; W. Dawes; D. Short and E. O'Loughlin. 1991, abr. Use of an expert system to map forest soils from a geographical information system. *International Journal of Geographical Information Science*, 5: 431– 445.

Soil Survey Staff. 1975. Soil taxonomy. USA: United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service. 754 p. (Agriculture Handbook N° 436).

Soil Survey Staff. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. 11a ed. USA: United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS). 366 p.

Steinwand, A.; R. Harrington and D. Groeneveld. 2001, nov. Transpiration coefficients for three Great Basin shrubs. *Journal of Arid Environments*, 49 (3): 555–567.

Tagil, S. and J. Jenness. 2008. GIS-based automated Landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 8 (6): 910-921.

Teillet, P.; B. Guindon y D. Goodenough. 1982, dic. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2): 84-106.

Uribe, J.; R. Cabrera; A. De la Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 232 p.

USDA (United States Department of Agriculture), USA. 2014. National soil survey handbook. [En línea]: Natural Resources Conservation Service. Recuperado en: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_05422> Consultado el: 5 de Septiembre de 2014.

Vanwallegem, T.; U. Stockmann; B. Minasny and A. McBratney. 2013, abr. A quantitative model for integrating landscape evolution and soil formation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2): 331-347.

Van Wambeke, A. y W. Luzio. 1982. Determinación de los regímenes de humedad y temperatura para los suelos de Chile. *Agricultura Técnica*, 42(2): 149-159.

Weiss, A. 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. En: ESRI Users' Conference (21, 9 al 13 de Julio, San Diego Convention Center). Trabajo presentado como poster. Weiss, A. San Diego, USA.

Wielemaker, W.; S. De Bruin; G. Epema and A. Veldkamp. 2001. Significance and application of the multi-hierarchical landsystem in soil mapping. *Catena*, 43 (1): 15– 34.

Wight, J. and R. Hanks. 1981, jul. A water-balance climate model for range herbage production. *Journal of Range Management*, 34 (4): 307–311.

Wight, J. and C. Hanson. 1990, nov. Crop coefficients for rangelands. *Journal of Range Management*, 43 (6): 482–485.

Wulder, M; J. White; S. Goward; J. Masek; J. Irons; Herold, M., *et al.* 2008. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 112 (3): 955–969.

Wulder, M. and S. Franklin. 2003. Remote sensing of forest environments: concepts and case studies. USA: Springer. 519 p.

Xu, X.; R. Zhang, X. Xue and M. Zhao. 1998. Determination of evapotranspiration in the desert area using lysimeters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29 (1-2):1–13.

ANEXO 1

Texturas de suelos y sus códigos correspondientes

Clase textural	Sigla clase textural
Franco arenoso	Fa
Franco	F
Franco limoso	FL
Franco arcillo arenoso	FA a
Franco arcilloso	FA
Franco arcillo limoso	FAL
Areno arcilloso	aA
Arenoso	a
Areno arcilloso	aA
Arcillo limoso	AL
Arcillo arenoso	Aa
Arcilla	A
Suelos orgánicos	O

ANEXO 2

Procedimiento de corrección de imágenes Landsat

- 1) Corrección lumínica.- Las variaciones en la forma del relieve, tienen una influencia significativa sobre las propiedades radiométricas de las señales recibidas por los sensores instalados en aviones y satélites. Como resultado de lo anterior, se han realizado una serie de estudios sobre la influencia de la topografía sobre las señales radiométricas (Wulder y Franklin, 2003). De esta forma, la mayoría de los procesos relacionados con corregir esta situación utilizan los DEMs, a partir de los cuales se puede obtener información sobre elevación del terreno, pendiente, exposición y otras variables que, en conjunto, describen la geomorfometría del paisaje (Wulder y Franklin, 2003). En base a lo anterior, la normalización lumínica, o corrección topográfica, se vale del DEM para minimizar y/o eliminar la influencia del terreno, con objeto de permitir trabajar con información espectral no alterada.

La corrección por el coseno se basa en el principio de que la cantidad de irradiancia emitida en un píxel inclinado es proporcional al coseno del ángulo de incidencia, definido como el ángulo entre la normal del píxel en cuestión y la dirección zenital (Wulder y Franklin, 2003). Ahora bien, Teillet *et al.* (1982) propone una modificación a la corrección por el coseno, que utiliza la pendiente (m_k) y el intercepto (b_k) de la curva de regresión obtenida a partir de una aproximación estadística-empírica (Wulder y Franklin, 2003). El resultado de esta relación es el parámetro C_k , como se puede observar en la siguiente fórmula.

$$C_k = \frac{b_k}{m_k} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde b_k = Constante de la recta de regresión lineal, y m_k = Pendiente de la recta de regresión lineal.

Teillet *et al.* (1982) describe la forma en que el parámetro C_k emula el efecto de la trayectoria de la radiancia sobre el relieve-pendiente del terreno.

Los parámetros b_k y m_k se generaron al aplicar el comando “REGRESS” en el software Idrisi Selva, el cual genera una regresión lineal entre archivos de imágenes, o bien entre archivos de valores de atributos. Los insumos que requiere este comando son la imagen satelital en su estado inicial (en Niveles Digitales, ND) y el “hillshade” generado a partir del DEM de la Región de Coquimbo.

El “hillshade” se genera a través del comando “SURFACE” en Idrisi, el cual permite calcular la pendiente, la exposición (“aspect”) y el sombreado del relieve, a partir del DEM.

Al ingresar los insumos al comando “REGRESS”, se ingresa el DEM como variable independiente; como variable dependiente, se ingresó cada una de las bandas de las imágenes. Adicionalmente, se ingresó como máscara un polígono compuesto, que incluye una zona sombreada y una zona sin sombra, para condiciones de cobertura similares. Esto último permite limitar el cálculo a un subgrupo de píxeles, caracterizados por encontrarse precisamente en zonas sombreadas, contrastados con píxeles sin sombreado.

De la ecuación de la recta resultante, cuyo valor R debe ser mayor a 0.7, se obtuvieron los parámetros (b_k) y (m_k), para cada una de las bandas consideradas de las 6 imágenes satelitales utilizadas para el presente trabajo.

Posteriormente, se procedió a realizar la corrección lumínica sobre los ND para cada una de las bandas de las imágenes, utilizando la Fórmula 2 (Teillet *et al.*, 1982).

$$ND_{(k)corregido} = ND_{(k)} \left(\frac{\cos \theta_i + C_k}{\cos \gamma_i + C_k} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde $ND_{(k)corregido}$ = banda corregida topográficamente, $ND_{(k)}$ = banda k a corregir, $\cos \gamma_i$ = imagen de iluminación obtenida con el comando *HILLSHADE*, θ_i = complemento del ángulo de elevación del sol, y $C_k = bk mk^{-1}$ (Ec. 1.1).

Una vez obtenidos los ND corregidos lumínicamente, se procedió a cambiar los ND a valores de Radiancia. Este paso es necesario para convertir la información de las bandas obtenidas a partir de múltiples sensores, a una escala radiométrica con un sentido físico (Chander *et al.*, 2009). Para este fin, se utilizó la Fórmula 3, informada por Chander et al (2009), la cual utiliza los factores G y B (Cuadro 1.1), los cuales son valores empíricos que permiten reescalar los ND a valores de radiancia.

$$L_\lambda = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde L_λ = Radiancia espectral a determinada apertura del sensor ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), Q_{cal} = valor cuantificado del valor del pixel (Nivel Digital, ND), $G_{rescale}$ = factor *gain* re-escalado para cada banda ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1} \text{DN}^{-1}$), y $B_{rescale}$ = factor *bias* re-escalado para cada banda ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

Los valores de $G_{rescale}$ y $B_{rescale}$ han sido informados para cada banda de las imágenes Landsat 7, por Chander *et al.* (2009), como se aprecia en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Rangos dinámicos post calibración de bandas de imágenes obtenidas con sensor ETM+, y valores promedio de irradiancia solar exoatmosférica (ESUN λ) para cada una de ellas.

Banda	Rango espectral	Longitud de onda central	LMIN λ	LMAX λ	G _{rescale}	B _{rescale}	ESUN λ
		μm	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$		$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1} \text{DN}^{-1}$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$
Low Gain (LPGS)							
1	0,452-0,514	0,483	-6,20	293,70	1,180709	-7,38	1997,00
2	0,519-0,601	0,560	-6,40	300,90	1,209843	-7,61	1812,00
3	0,631-0,692	0,662	-5,00	234,40	0,942520	-5,94	1533,00
4	0,772-0,898	0,835	-5,10	241,10	0,969291	-6,07	1039,00
5	1,547-1,748	1,648	-1,00	47,57	0,191220	-1,19	230,80
6	10,31-12,36	11,335	0,00	17,04	0,067087	-0,07	N/A
7	2,065-2,346	2,206	-0,35	16,54	0,066496	-0,42	84,90
PAN	0,515-0,896	0,706	-4,70	243,10	0,975591	-5,68	1362,00
High Gain (LPGS)							
1	0,452-0,514	0,483	-6,20	191,60	0,778740	-6,98	1997,00
2	0,519-0,601	0,560	-6,40	196,50	0,798819	-7,20	1812,00
3	0,631-0,692	0,662	-5,00	152,90	0,621654	-5,62	1533,00
4	0,772-0,898	0,835	-5,10	157,40	0,639764	-5,74	1039,00
5	1,547-1,748	1,648	-1,00	31,06	0,126220	-1,13	230,80
6	10,31-12,36	11,335	3,20	12,65	0,037205	3,16	N/A
7	2,065-2,346	2,206	-0,35	10,80	0,043898	-0,39	84,90
PAN	0,515-0,896	0,706	-4,70	158,30	0,641732	-5,34	1362,00

Fuente: Chander et al. (2009)

- 2) Corrección atmosférica.- Una vez obtenida las bandas con en valores de radiancia, se procedió a efectuar la corrección lumínica, consistente en eliminar el efecto que tiene la atmosfera, que al absorber, transmitir e irradiar la energía proveniente de la superficie terrestre, modifica la medición realizada por los sensores del satélite Landsat 7 (Chander *et al.*, 2009).

Con este objetivo, se utilizó la técnica de restar a todos los píxeles de cada banda la radiancia promedio de los cuerpos de agua (mar, embalses), que de no ser por la atmósfera, debiesen emitir una radiancia igual a cero (Chuvieco, 2008). Este proceso se realizó para cada una de las 6 bandas evaluadas para todas las escenas consideradas para este trabajo, utilizando la Fórmula 4 para este proceso.

$$L_{\text{sen}(k)}' = L_{\text{sen}(k)} - L_{\text{sen}(k)\text{mínimo}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde $L_{\text{sen}(k)}'$ = radiancia de la banda k corregida atmosféricamente, $L_{\text{sen}(k)}$ = radiancia espectral recibida por el sensor de la banda k , y $L_{\text{sen}(k)\text{mínimo}}$ = valor mínimo de la radiancia en la banda k .

Posterior al proceso de corrección atmosférica, se procedió a transformar los valores de radiancia a reflectividad. De esta manera, el proceso busca reducir la variabilidad entre escenas, al convertir los valores de radiancia a valores de reflectancia para la parte alta de la atmósfera (“Top Of Atmosphere”, TOA), también conocido como albedo planetario de las bandas (“in-band planetary albedo”). Esta conversión permite remover el efecto del coseno para distintos ángulos zenitales que puedan darse por diferencias en la fecha de adquisición de las imágenes, entre otros beneficios (Chander *et al.*, 2009).

La Fórmula 5 permite realizar la conversión de valores de radiancia a valores de reflectancia, los cuales corresponden a la relación entre la energía incidente y la energía reflejada por una superficie para una banda, razón por la que los valores quedan comprendidos entre 0 y 1 (Castillo, 2007).

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde ρ_{λ} = Reflectancia planetaria en la parte alta de la atmósfera, L_{λ} = Radiancia espectral a determinada apertura del sensor ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), d^2 = distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas, ua), $ESUN_{\lambda}$ = irradiancia solar exo-atmosférica promedio ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$), y θ_s = ángulo solar zenital (radianes).

El valor del promedio de irradiancia solar exoatmosférica ($ESUN_{\lambda}$) para cada banda se puede observar en el Cuadro 1.1. En cuanto a los valores del ángulo cenital, θ_s , este se obtiene del metadata de cada escena descargada, como el complemento del ángulo de elevación del Sol, en radianes. El valor de d^2 , que corresponde al factor de corrección de la distancia Tierra-Sol, que corresponde a esa distancia en unidades astronómicas, es informado por Chander *et al.* (2009), a partir del conocimiento del día juliano en el cual la imagen fue obtenida.

APÉNDICE 1

Detalle unidades geológicas de la Región de Coquimbo y Clases texturales esperadas a partir de materiales rocosos que las conforman

Secuencias Sedimentarias																
Unidad geológica (SERNAGEOMIM, 2003)	Categorías Porta et al. (2003)									Tipos de rocas considerados adicionalmente			Tamaños de partículas esparadas (Porta et al. (2003))			Interpretación Clase textural
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	conglomerado	fangolita	toba (tuff)	a	A	L	
PPL1r				X		X						a		L	F	
Qa				X		X						a		L	F	
Q1g				X		X						a		L	F	
Qf				X		X						a		L	F	
DC1				X		X			X			a, a		L	F	
CP1				X	X	X						a		L, L	FL	
TrJ1m				X	X	X						a		L, L	FL	
Tr1m				X	X	X			X			a		L, L	FL	
Kl1m				X	X	X						a		L, L	FL	
Qm				X								a			a	
Q1				X								a			a	
Qe				X								a			a	
Ji1m	X		X	X	X	X			X			a, a	A	L, L	F	
MP1c				X		X			X			a, a		L	F	
Js1c				X					X			a, a			a	
TrJ1c	X		X	X	X	X			X		X	a, a, a	A	L	F	
MP1m				X	X	X			X	X		a, a, a	A	L, L	F	
Kla1C				X		X			X		X	a, a, a		L	F	

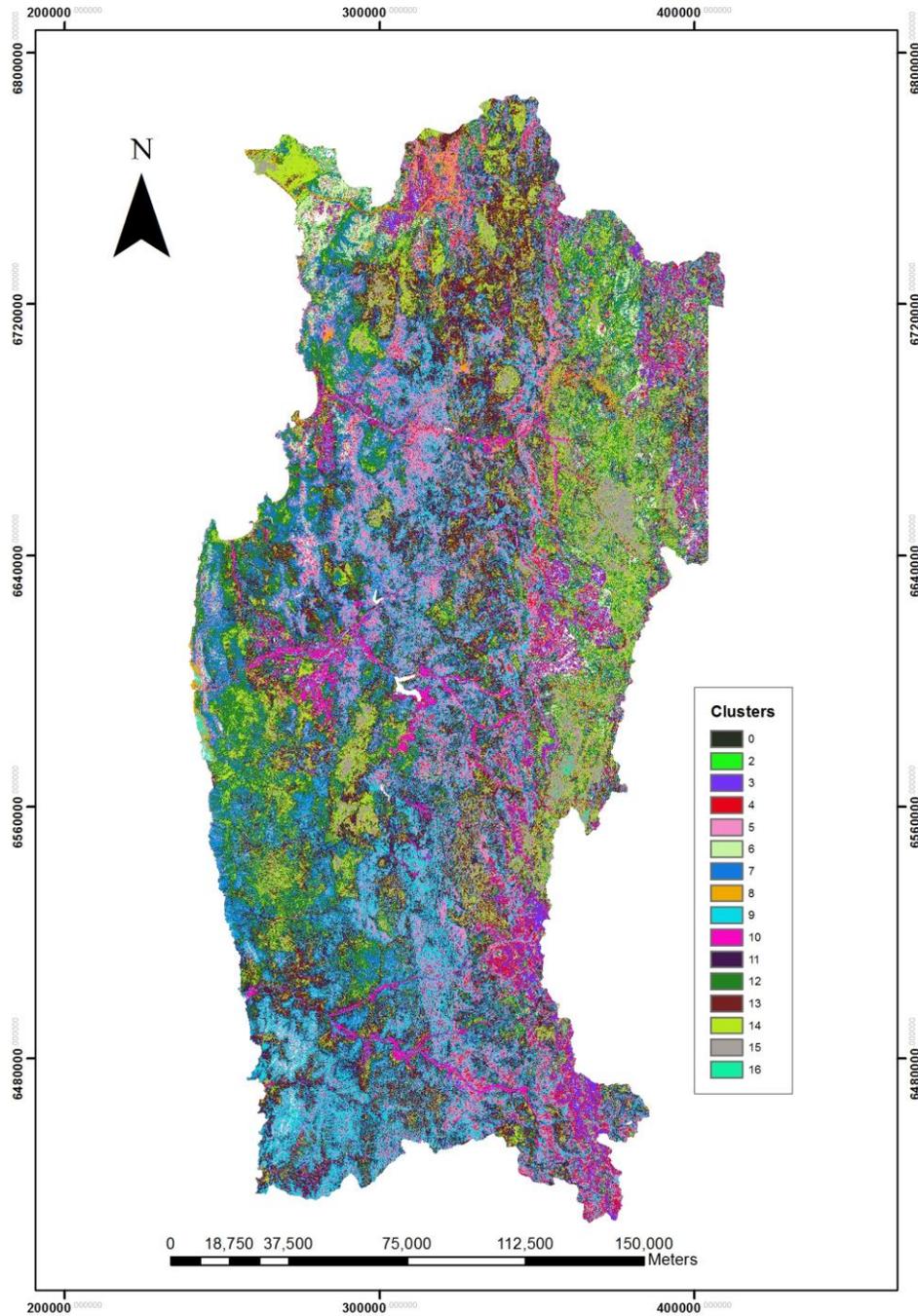
Secuencias Volcano-sedimentaria																
Unidad geológica (SERNAGEOMIM, 2003)	Categorías Porta et al. (2003)									Tipos de rocas considerados adicionalmente			Tamaños de partículas esparadas (Porta et al. (2003))			Interpretación Clase textural
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	conglomerado	fangolita	toba (tuff)	a	A	L	
Ki2m	X		X	X	X							a	A	L	F	
J2m	X		X	X	X							a	A	L	F	
Kla2	X											a	A		F	
Tr2c					X						X	a		L	F	
Ks2c	X											a			aF	
Js2c	X											a			a	
Kl2c				X	X	X			X			a, a		L, L	F	
E2c				X							X	a, a			a	
OM2c	X												A		FA	

Secuencias Volcánica																
Unidad geológica (SERNAGEOMIM, 2003)	Categorías Porta et al. (2003)									Tipos de rocas considerados adicionalmente			Tamaños de partículas esparadas (Porta et al. (2003))			Interpretación Clase textural
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	conglomerado	fangolita	toba (tuff)	a	A	L	
JK3	X	X											a	A		F
E3	X	X											a	A		F
OMB	X												a			a
Ks3a	X												a			a
PE3a	X												a			a
Ms3t	X												a			a
Ms3i	X												a			a
J3l		X				X				X			a, a	A	L	F
TrJ3		X		X						X			a, a	A		F
CP3	X			X	X							X	a, a, a		L	F
PTr3	X			X						X		X	a, a, a, a			a
M3l		X												A		FA
Kla3	X	X											a	A		F
PE3l		X												A		FA
Ks3l		X												A		FA

Secuencias Intrusivas																
Unidad geológica (SERNAGEOMIM, 2003)	Categorías Porta et al. (2003)									Tipos de rocas considerados adicionalmente			Tamaños de partículas esparadas (Porta et al. (2003))			Interpretación Clase textural
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	conglomerado	fangolita	toba (tuff)	a	A	L	
Og	X												a			Fa
Eg	X												a			Fa
Peg	X												a			Fa
KTg	X												a			Fa
Ksh	X												a			Fa
Kiag	X												a			Fa
Kibg	X												a			Fa
Jsg	X												a			Fa
TrJg	X												a			Fa
TrJg	X												a			Fa
CPg	X												a			Fa
Ptrg	X												a			Fa
Mh	X												a			Fa
Ksg	X												a			Fa
Mimg	X												a			Fa
Msh	X												a			Fa
Jig	X												a			Fa

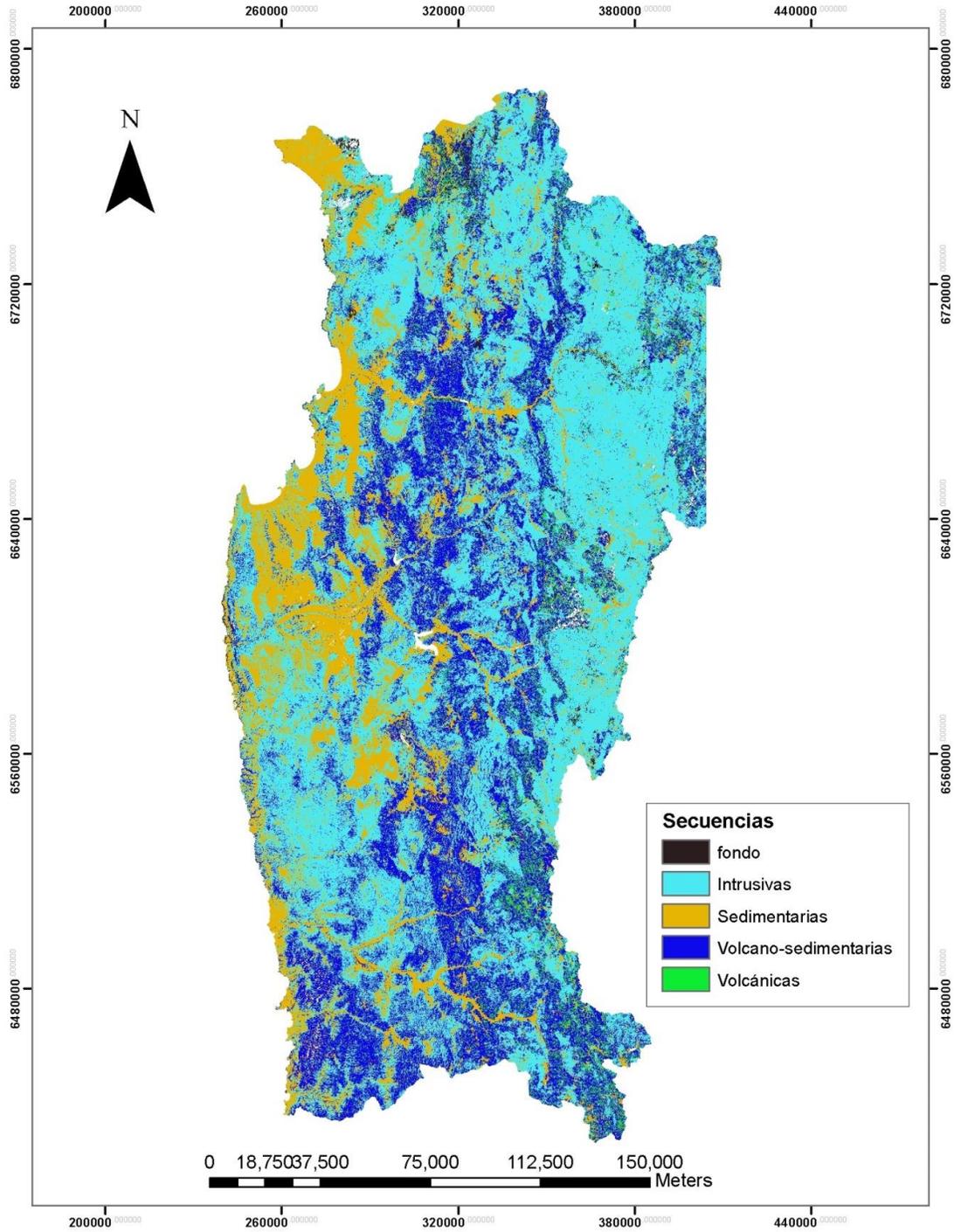
APÉNDICE 2

Clasificación de superficie Región de Coquimbo en “Clusters” mediante ISO CLUSTER no supervisado, a partir de combinación de bandas espectrales 7-4-1.



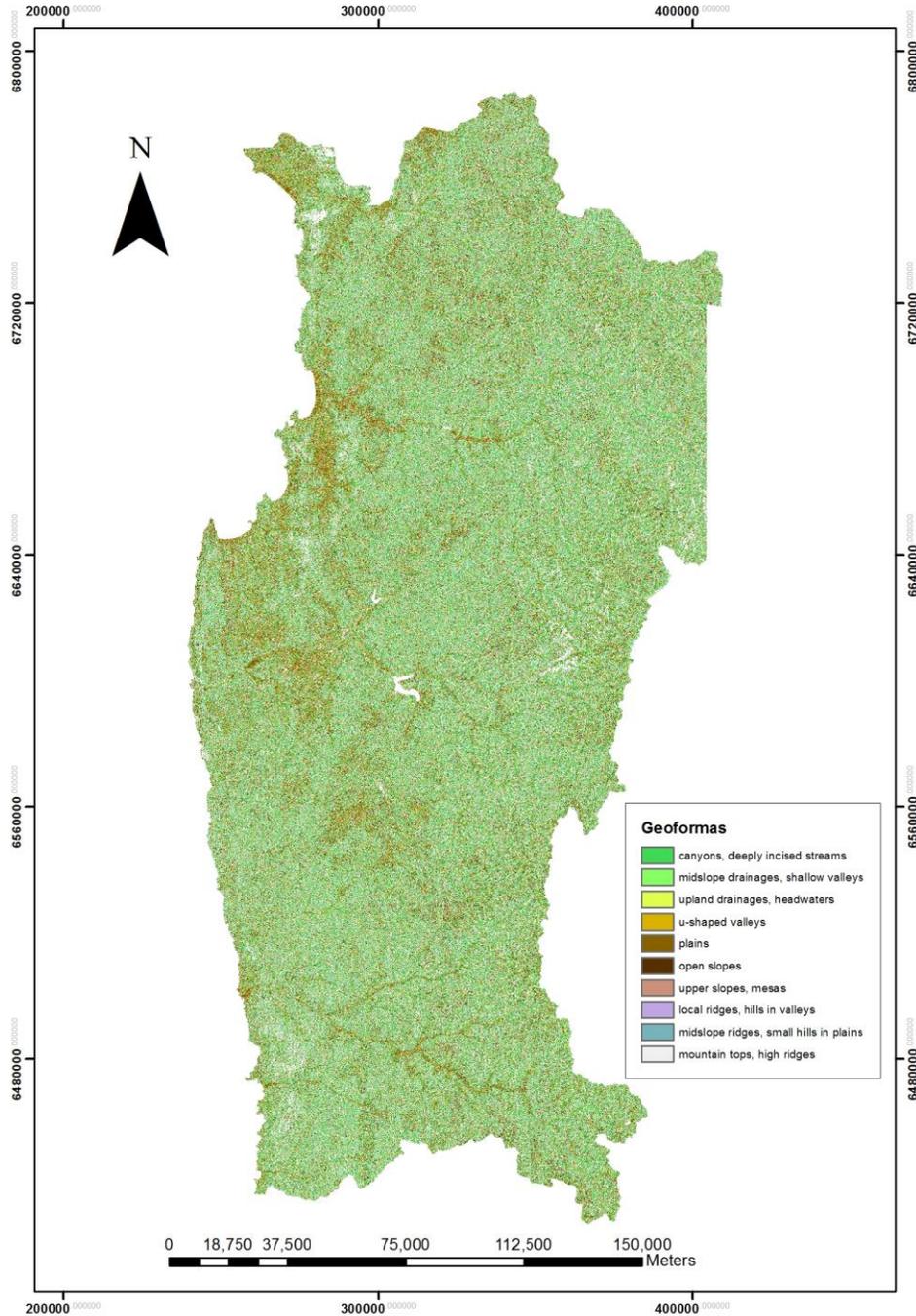
APÉNDICE 3

Clasificación superficie de la Región de Coquimbo según Secuencias Geológicas



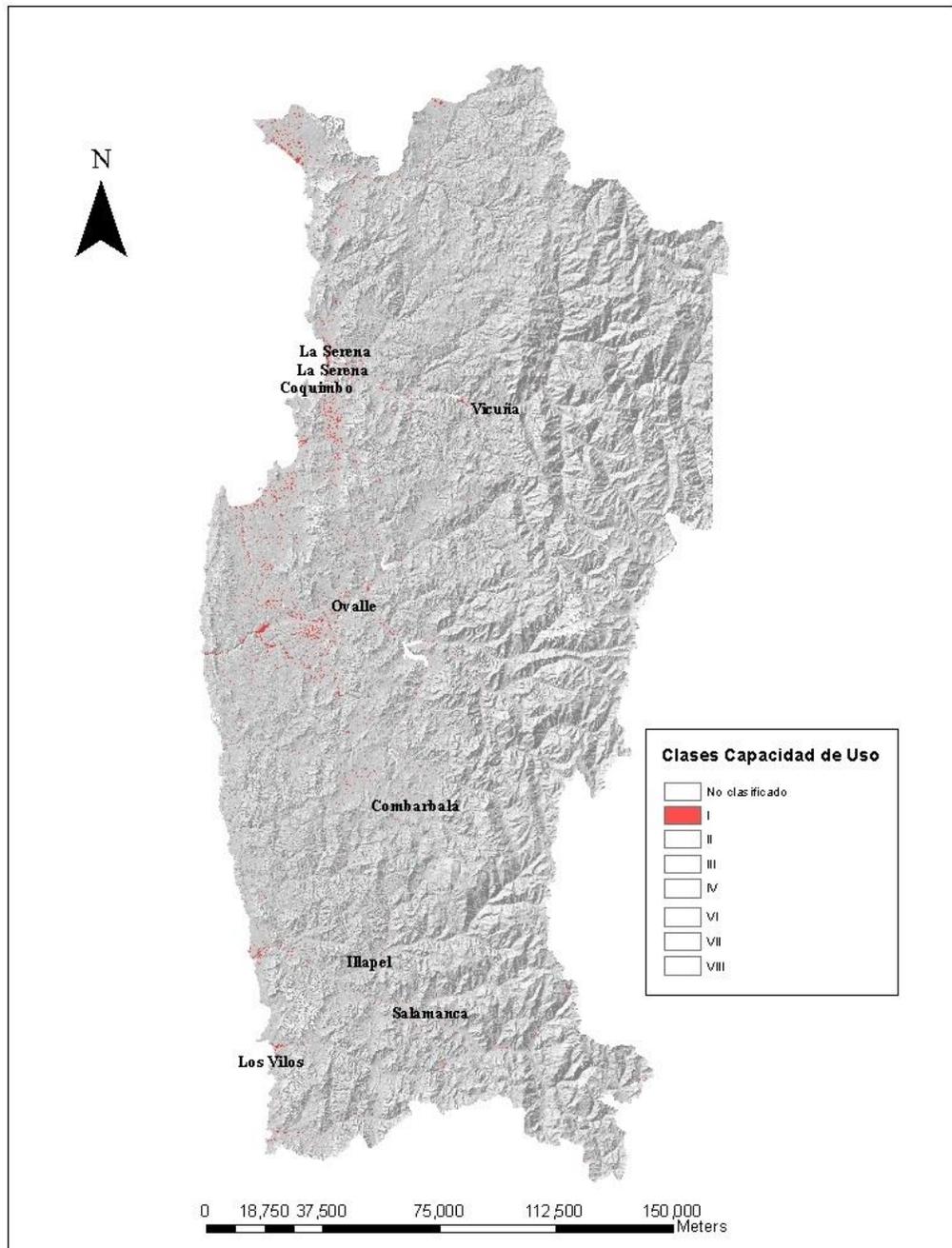
APÉNDICE 4

Resultado aplicación TPI de 60 m (SN) y 120 m (LN)



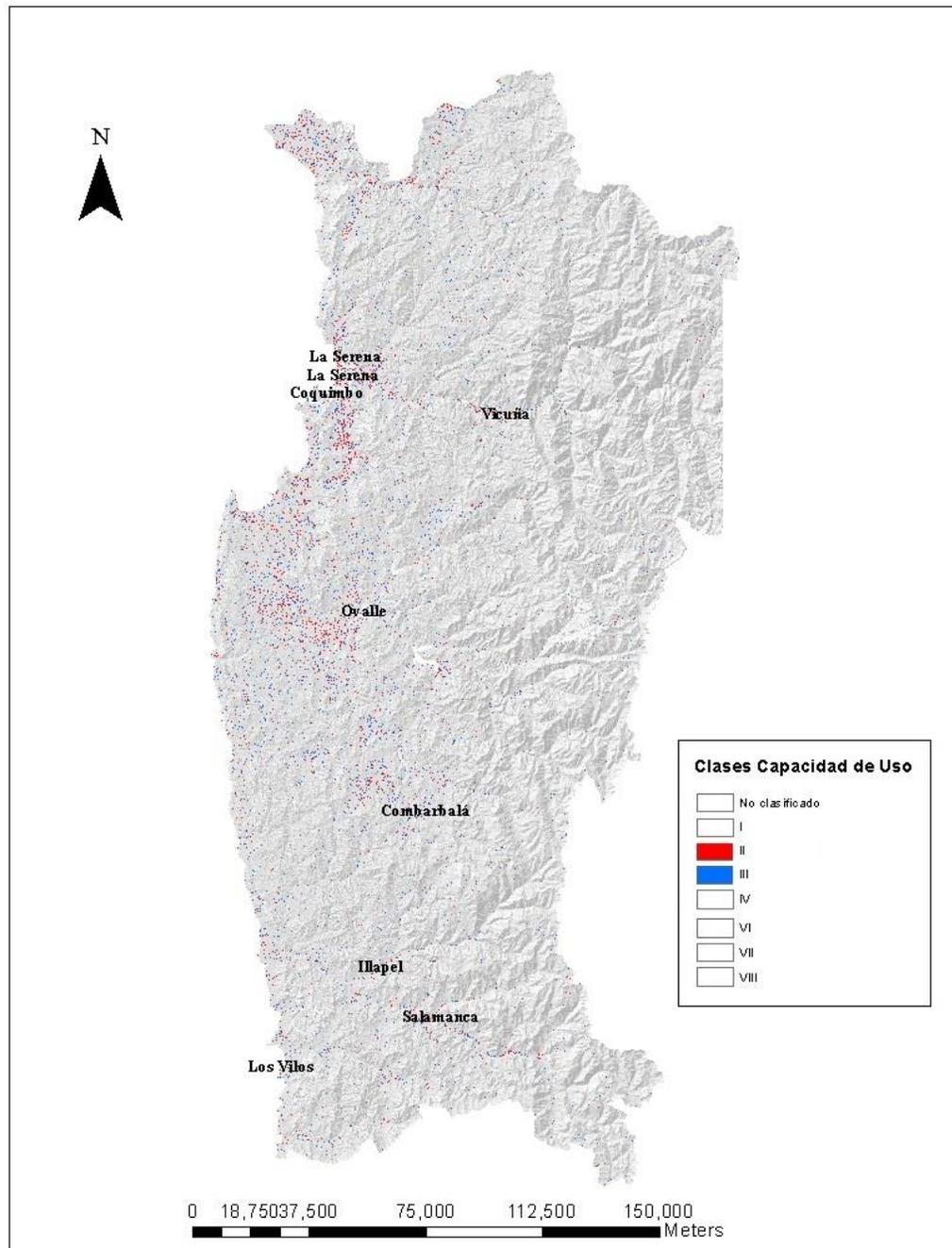
APÉNDICE 5

Ocurrencia espacial de Clase de Capacidad de Uso I en la Región de Coquimbo, Chile, a partir de aplicación de modelo de clasificación experta detallado en la Figura 4



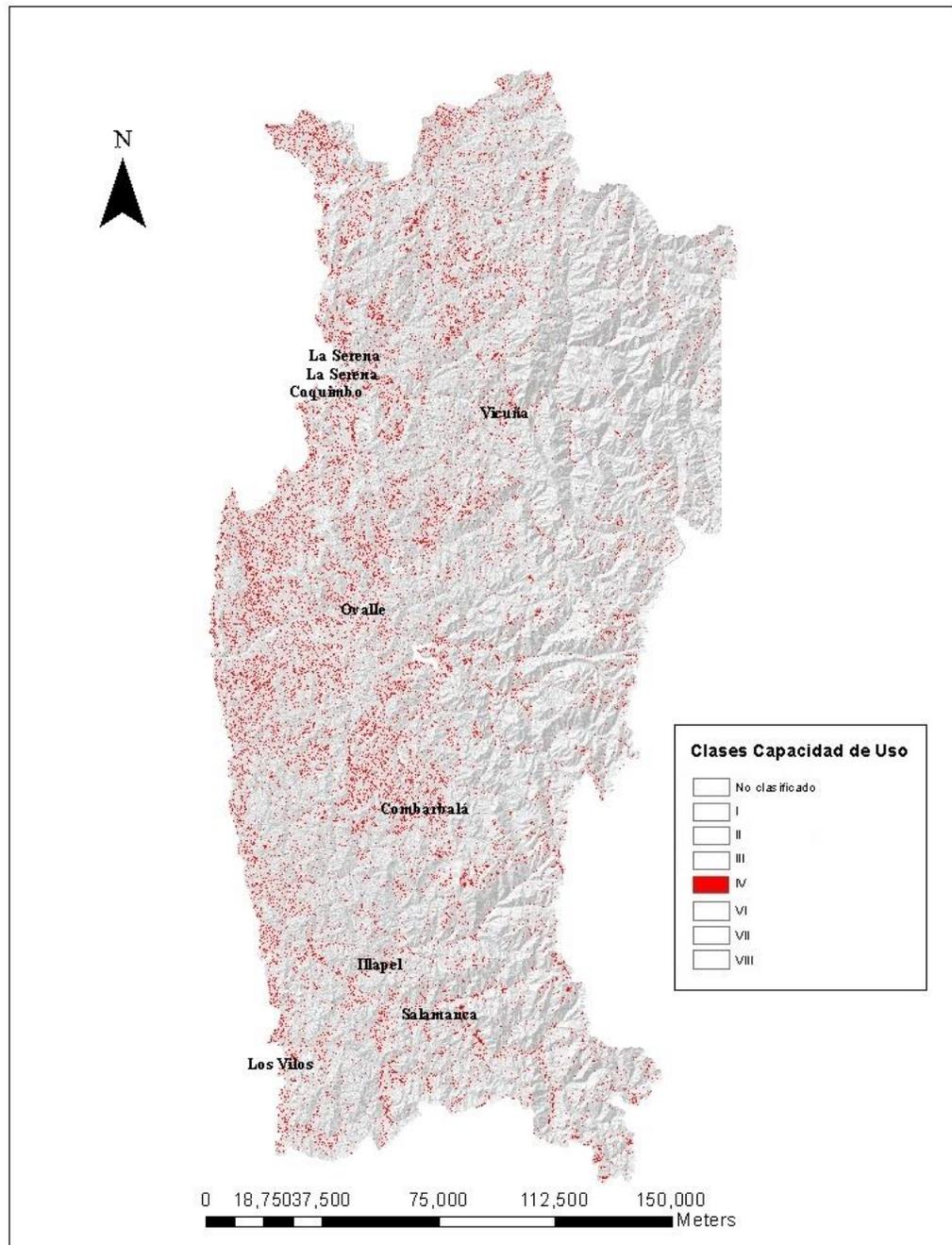
APÉNDICE 6

Ocurrencia espacial de las Clases de Capacidad de Uso II y III en la Región de Coquimbo, Chile, a partir de aplicación de modelo de clasificación experta detallado en la Figura 4



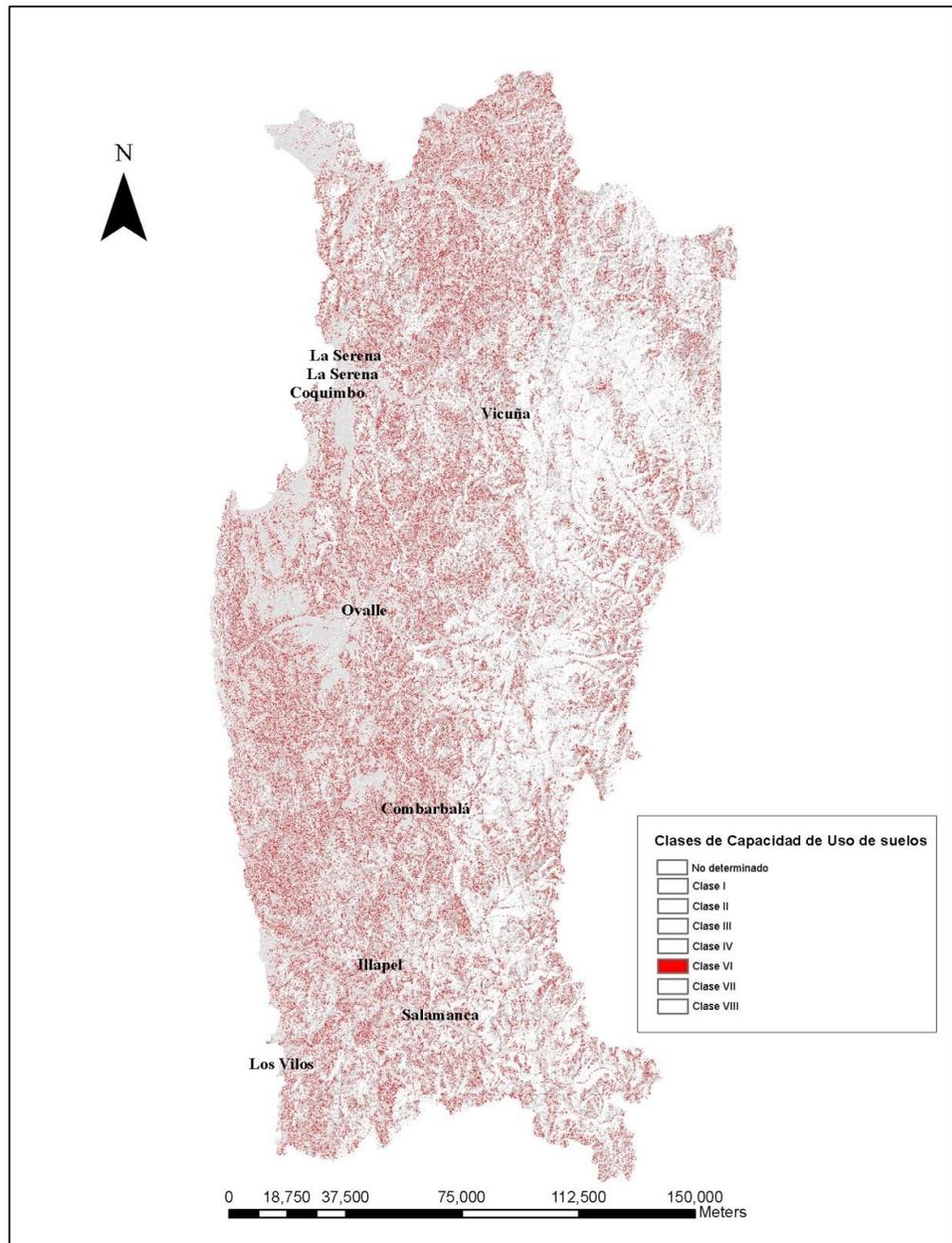
APÉNDICE 7

Ocurrencia espacial de Clase de Capacidad de Uso IV en la Región de Coquimbo, Chile, a partir de aplicación de modelo de clasificación experta detallado en la Figura 4



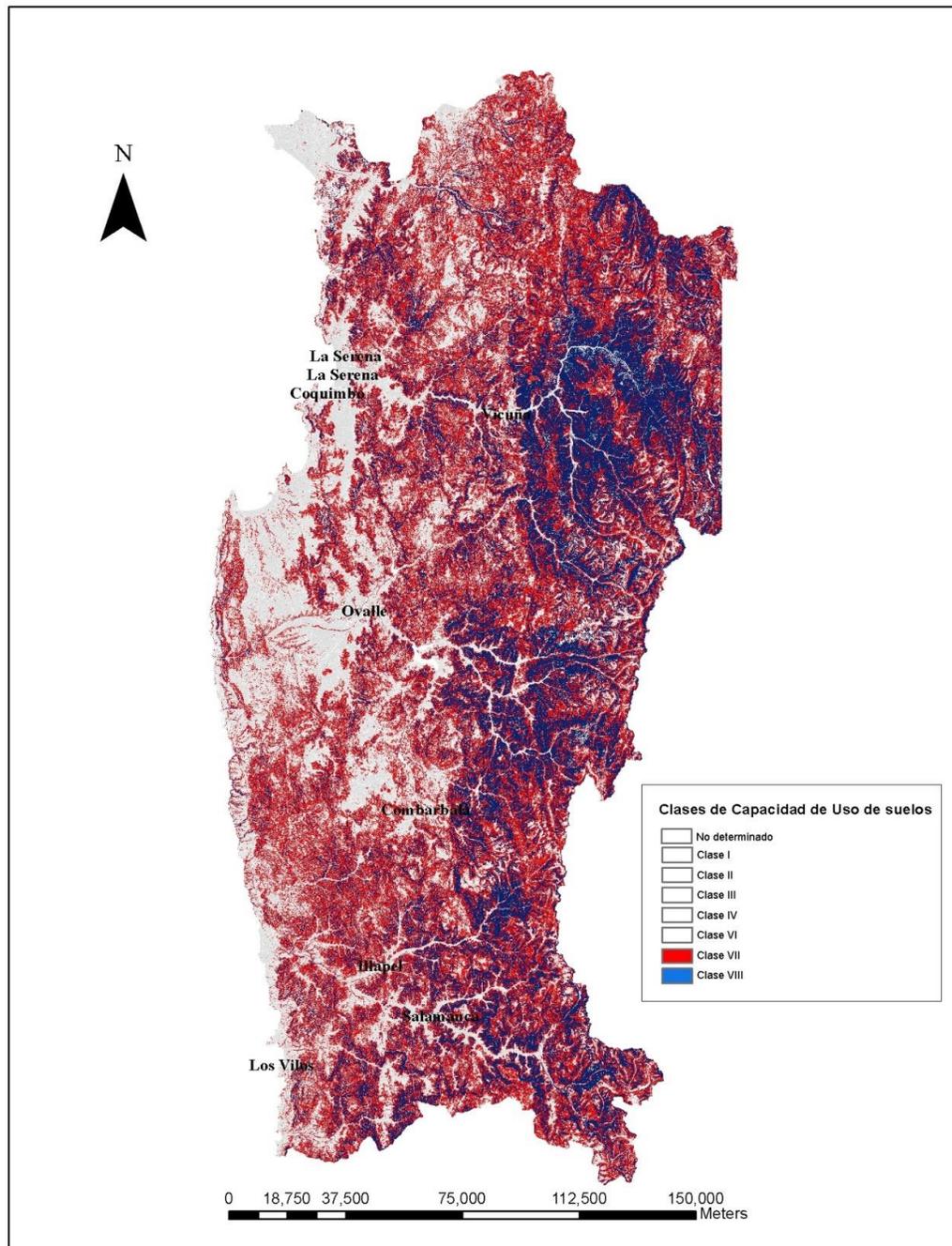
APÉNDICE 8

Ocurrencia espacial de Clase de Capacidad de Uso VI en la Región de Coquimbo, Chile, a partir de aplicación de modelo de clasificación experta detallado en la Figura 4



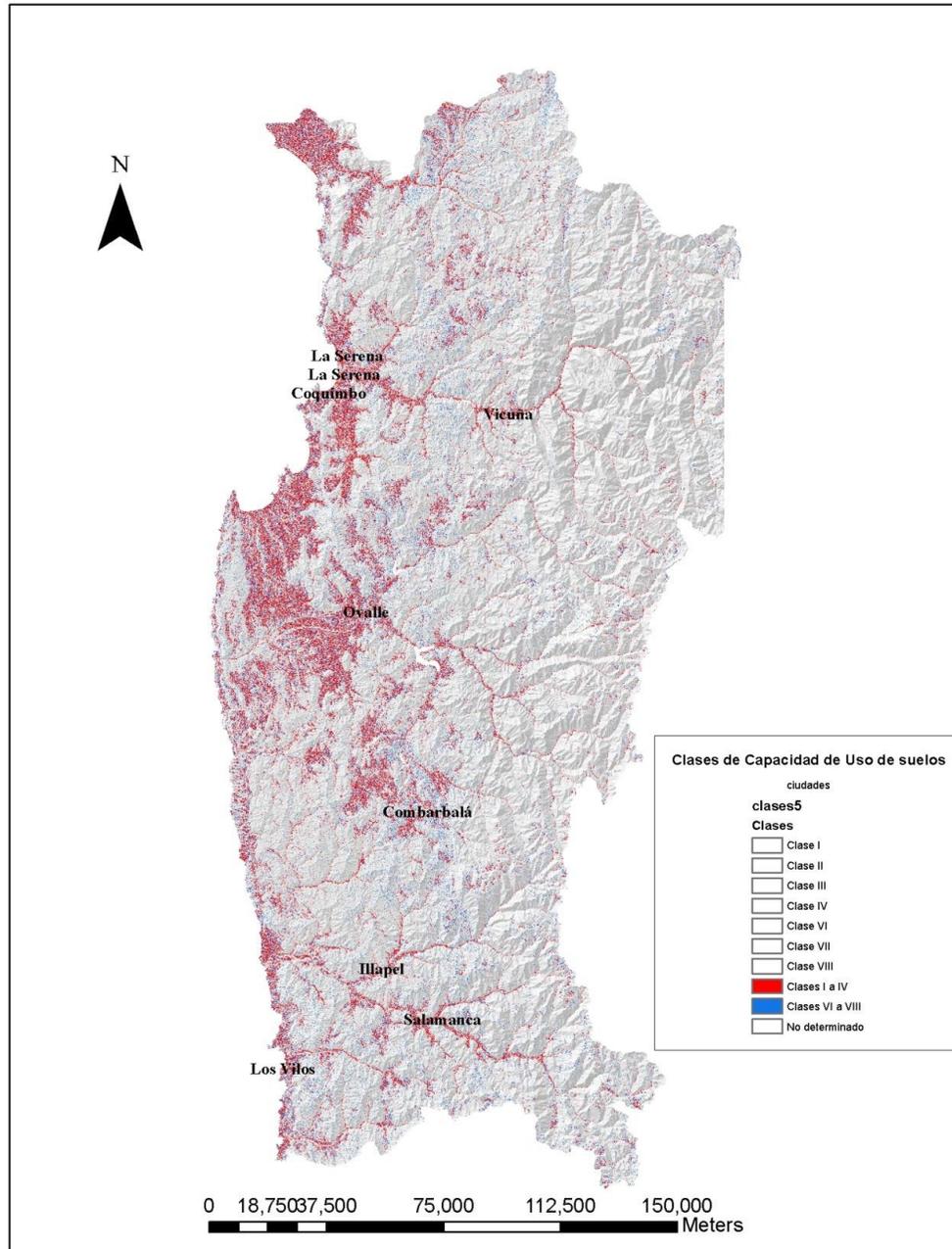
APÉNDICE 9

Ocurrencia espacial de Clase de Capacidad de Uso VII y VIII en la Región de Coquimbo, Chile, a partir de aplicación de modelo de clasificación experta detallado en la Figura 4



APÉNDICE 10

Ocurrencia espacial de categorías Clases I a IV y Clases VI a VIII en la Región de Coquimbo, Chile, a partir de reclasificación de unidades no consideradas en el modelo de clasificación experta detallado en la Figura 4



APÉNDICE 11

Ocurrencia espacial de los puntos de control para la validación de los resultados del modelo experto de decisión en la Región de Coquimbo, Chile

