



Revista de Geografía Norte Grande

ISSN: 0379-8682

hidalgo@geo.puc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Castro Avaria, Consuelo; Montaña Soto, Álvaro; Pattillo Barrientos, Carlos; Zúñiga Donoso, Álvaro
Detección del área con desierto florido en el territorio del Mar de Dunas de Atacama, mediante
percepción remota

Revista de Geografía Norte Grande, núm. 57, mayo, 2014, pp. 103-121

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30030855008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Detección del área con desierto florido en el territorio del Mar de Dunas de Atacama, mediante percepción remota¹

Consuelo Castro Avaria², Álvaro Montaña Soto³, Carlos Pattillo Barrientos⁴
y Álvaro Zúñiga Donoso⁵

RESUMEN

El Mar de Dunas de Atacama, situado al noroeste de Copiapó 27°S, cubre una superficie de 335 kilómetros cuadrados constituyendo un “erg” cuya morfología es muy compleja por la influencia topográfica de valles y cerros subyacentes. El espacio natural circundante corresponde a las terrazas marinas de Caldera y a planos inclinados cubiertos por mantos eólicos donde ocurre la floración del desierto. El territorio en conjunto es parte del geopatrimonio de Atacama, cuyo valor científico y natural se incrementa también por la vegetación de niebla existente. Utilizando imágenes satelitales y levantamientos de terreno, se determinó la distribución espacial del fenómeno del desierto florido y de la vegetación de niebla en el territorio próximo al Mar de Dunas. Los resultados junto a la cartografía generada, constituyen una base científica necesaria para las propuestas de ordenación territorial de dicho espacio.

Palabras clave: Mar de Dunas, desierto florido, *tillandsias*, imágenes satelitales, percepción remota.

ABSTRACT

The Atacama Dune Sea is located northwest of Copiapó (27 ° S) and covers an area of 335 km², constituting an “erg” whose morphology is very complex due to the influence of underlying valley and hill topography. The natural space environment corresponds to Caldera’s marine terraces and inclined planes covered by aeolian mantles where desert blooms occur. The entire territory is part of the Atacama’s geo-heritage, whose natural and scientific value is increased by the existent fog vegetation. Using satellite imagery and field surveys, we determined the spatial distribution of the blooming desert phenomenon and fog vegetation present in the Dune Sea area. Our results, in conjunction with the cartography generated, constitute a useful and necessary scientific basis for land use planning in this invaluable territory.

Key words: Dune Sea, blooming desert, *tillandsias*, satellite images, remote sensing.

¹ Agradecimientos a FONDECYT por el financiamiento del Proyecto N° 1100400 y a Francisco Chirino, Jorge Espinoza y Nancy Matus del Gobierno Regional de Atacama, por su dedicada colaboración y apoyo. Artículo recibido el 12 de abril de 2012, aceptado el 13 de junio de 2013 y corregido el 27 de septiembre de 2013.

² Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile). E-mail: consuelo@uc.cl

³ Centro de estudio y conservación del patrimonio natural, CECPAN (Chile). E-mail: agmontan@uc.cl

⁴ Centro de Percepción Remota (Chile). E-mail: carlos.pattillo@cpr.cl

⁵ Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile). E-mail: azunigdo@uc.cl

El medio natural en el área de Caldera y Copiapó, posee variados elementos geomorfológicos, geológicos y paleontológicos que constituyen un geopatrimonio (Murray, 2004: 6) de gran interés científico, educacional y cultural. Dichos lugares, acorde con los postulados de UNESCO (1999), corresponden a geositos destacados de la III Región de Atacama (Castro *et al.*, 2007: 111). Así, la relevancia geopatrimonial del Mar de Dunas de Atacama ha sido señalada en varios artículos científicos que fundamentan su singularidad geomorfológica y sedimentológica, junto con la recomendación de propender a su preservación (Araya-Vergara, 2001: 63; Paskoff *et al.*, 2003: 356; Castro *et al.*, 2012:14).

La relevancia del espacio natural señalando, se acrecienta aún más por la existencia de ecosistemas desérticos originales de vegetación de niebla y por la germinación del desierto florido, cuya biogeografía y especies vegetales han sido expuestas en los trabajos de Cereceda *et al.*, 2000: 38; Luebert *et al.*, 2006: 73; Gutiérrez, 2008: 285; Squeo *et al.*, 2008a: 29; Squeo *et al.*, 2008b: 5; entre otros. En efecto, concurren en dicho territorio un conjunto de condiciones propicias para la germinación esporádica del desierto y la existencia de vegetación de niebla en lugares favorables, todo lo cual incrementa la importancia natural y científica de dicho espacio del desierto costero del norte de Chile.

Por sus atributos paisajísticos y naturales, el Servicio Nacional de Turismo ha delimitado y designado el área del Mar de Dunas como Zona de Interés Turístico (ZOIT; SERNATUR, 2007: 9). En efecto, las dunas y su entorno son el escenario y soporte de actividades turísticas y deportivas extremas como el Raid de Atacama desde 1985 y el Rally Dakar a partir del año 2009. La importancia económica del lugar también se debe a la explotación minera del subsuelo y de las arenas eólicas ricas en hierro. De este modo, concurren en dicho espacio el interés económico con la necesidad de preservar su naturalidad y calidad paisajística debido al interés científico que posee (Paskoff *et al.*, 2003: 355; Araya-Vergara, 2001: 27; Castro *et al.*, 2012: 123; Castro *et al.*, 2013: 64).

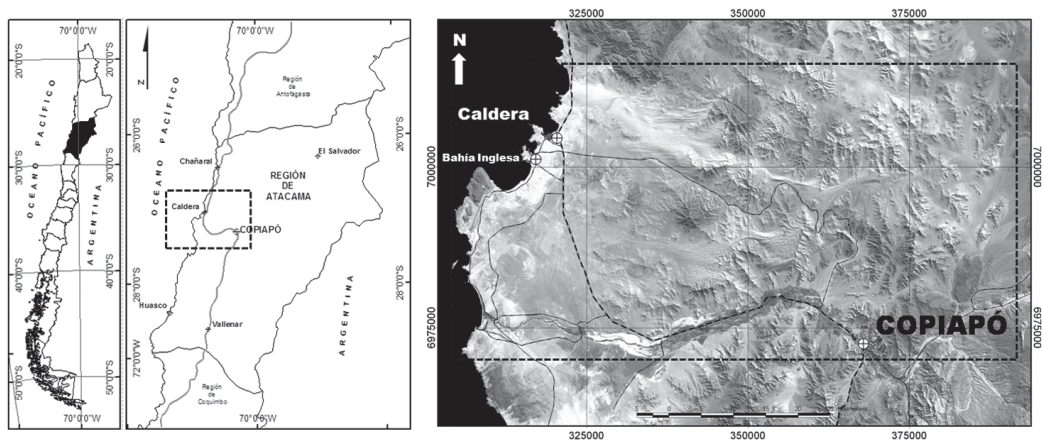
De acuerdo a lo anterior, cabe preguntarse: ¿Cuáles son los sitios donde germina

el desierto florido y la vegetación de niebla en el Mar de Dunas y terrenos circundantes? ¿Hay vegetación en las dunas activas? ¿Es adecuado el uso de imágenes satelitales para la detección de la vegetación en un medio arenoso de alta reflectancia? ¿Cómo el estudio espacial de la vegetación contribuye al ordenamiento territorial en el área de estudio?

Así, en este artículo se exponen los resultados de un estudio para determinar la distribución espacial del desierto florido y de la vegetación de niebla en el Mar de Dunas y el territorio aledaño que corresponde a las terrazas marinas de Caldera y los planos inclinados o glacis ver Figuras N° 1 y N° 2), con el fin de aportar los datos necesarios para un estudio integrado que sirva para entregar recomendaciones para la ordenación territorial del área. En efecto, el análisis de la distribución de la vegetación se efectuó dentro del contexto de una investigación más amplia llevada a cabo con el objetivo de fundamentar la originalidad y relevancia territorial del Mar de Dunas como elemento constituyente del geopatrimonio del desierto de Atacama (Castro, 2005: 114; Castro *et al.*, 2012: 130; Castro *et al.*, 2013: 64). Así, la cartografía del desierto florido y de la vegetación de niebla que se presentan en este artículo, son parte de los datos científicos requeridos para elaborar una propuesta de zonificación del área de emplazamiento del Mar de Dunas, según metodologías de análisis espacial multicriterio (Barredo, 1996: 54; Saaty, 2001: 124). En dicha zonificación, la presencia de vegetación singular es uno de los criterios esenciales de valoración para la determinación de unidades territoriales, el cual se integra con otros criterios relevantes como son la presencia de geositos en el área; su interés geomorfológico; y la existencia de áreas de protección, según se expone en Castro *et al.*, 2013: 58.

Entonces, en este artículo se presentan los antecedentes geográficos del área de estudio; se expone la metodología para el análisis espacial del desierto florido y de la vegetación de niebla; se determinan los factores geográficos de dicha distribución junto al análisis de la cartografía generada y, finalmente, se concluye respecto del interés de la metodología empleada y las características de las áreas de floración del desierto y vegetación de niebla

Figura N°1
Mar de Dunas de Atacama y su entorno, Copiapó.



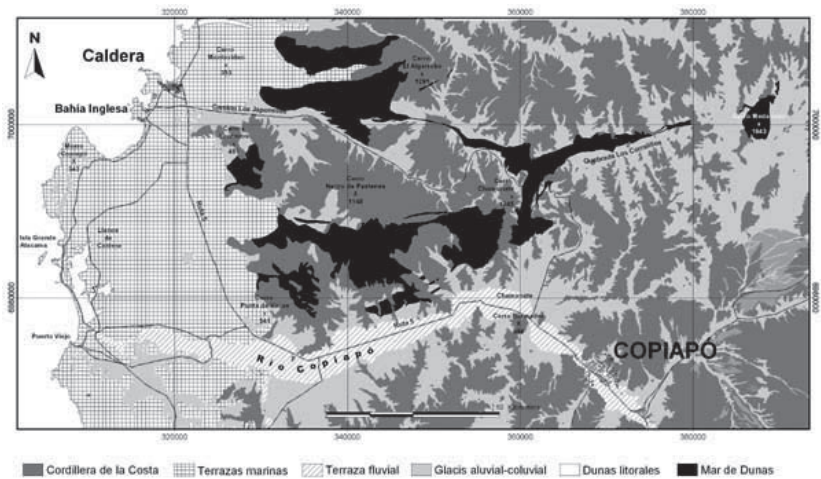
Fuente: Elaboración propia.

en el lugar de emplazamiento del Mar de Dunas de Atacama, Figura N° 1.

Situado al noroeste de la ciudad de Copiapó, el Mar de Dunas de Atacama corresponde a un vasto conjunto de dunas desérticas continentales que conforman un *erg* (Fryberger *et al.*, 1979: 140; Araya-Vergara, 2001: 31), el cual cubre una superficie de

335 kilómetros cuadrados (Castro *et al.*, 2012:1). La morfología de las dunas está influenciada por la topografía de valles y cerros subyacentes, y se reconocen tipologías de formas dunarias compuestas y complejas (Livingstone *et al.*, 2007: 250; Araya-Vergara, 2001: 62; Paskoff *et al.*, 2003: 356; Castro *et al.*, 2012: 131).

Figura N° 2
Unidades geomorfológicas de la zona costera de Caldera y Copiapó, Atacama.



Fuente: Castro *et al.*, 2012: 124.

El cuerpo principal del *erg* de Atacama se compone de voluminosas dunas activas desprovistas de vegetación; sin embargo, en los márgenes que las delimitan y los terrenos próximos se reconocen diversos tipos de dunas entrabadas por algunas especies vegetales que se disponen dispersas. En efecto, los interfluvios que separan los distintos campos de dunas corresponden a planos inclinados de glaciais aluvio-columbiales; laderas de cerros y terrazas marinas cubiertas por mantos de arenas eólicas de escaso espesor (Figura N° 2) (Castro *et al.*, 2011: 53; Castro *et al.*, 2012: 9).

El clima en el área es desértico nuboso de influencia oceánica, con una temperatura promedio de 15° Celsius y una moderada variación térmica diaria y anual. Las lluvias son muy escasas y ocurren en los meses de invierno, alcanzando un promedio anual de 32 mm en Caldera; las lluvias ocasionales que provocan la floración del desierto ocurren en los años de eventos El Niño-Oscilación del Sur como se muestra en el Cuadro N° 1. De acuerdo a Luebert *et al.* (2006: 284), los bioclimas que condicionan la vegetación natural en el sector costero de la Región de Atacama son el Mediterráneo Hiperdesértico (hasta los 28° de latitud) y el Mediterráneo Desértico-oceánico hasta 29° 30' Sur.

Cuadro N° 1
Lluvias asociadas a eventos El Niño, período 1970-1997 estación Copiapó-Chamonte 27°24' S / 70°24' W

Año	mm	Año	mm
1970	3	1984	27,3
1971	0	1985	3,5
1972	s/i	1986	9,8
1973	7,5	1987	60,6
1974	3	1988	1,9
1975	2,5	1989	16,5
1976	3,1	1990	s/i
1977	11,7	1991	59,2
1978	0	1992	38,7
1979	s/i	1993	0
1980	29,3	1994	0
1981	5	1995	0
1982	0,5	1996	0
1983	42,6	1997	138,6

s/i: Sin información.
Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, varios años.

Con respecto a las metodologías empleadas para el estudio del medio natural de los desiertos, el uso de las imágenes satelitales ha sido fundamental en las investigaciones geomorfológicas de los *erg*, porque permite una mejor comprensión de la estructura interna y disposición de estos complejos sistemas geomorfológicos. Los trabajos de Livingstone *et al.* (2007: 241) y también Kocurek *et al.* (2005: 95) coinciden en la utilidad de las imágenes de satélites para clasificar las dunas según tipologías geomorfológicas y, particularmente, en la determinación de los patrones internos de organización de los vastos mares de arena continentales.

En relación al estudio de la vegetación de los desiertos a partir de imágenes satelitales, Hesse (2012: 33) y Borthagaray *et al.* (2010: 18), respectivamente, emplean imágenes de alta resolución para el análisis y mapeo de la distribución espacial de la vegetación de niebla en la costa peruana. En Chile, Castro *et al.* (2005: 31), a partir de imágenes Landsat y medición de radiometría de campo en el sector costero de la bahía de Tongoy, determinaron las curvas espectrales características de playas, dunas y distintas especies vegetales, lo cual facilita el reconocimiento, delimitación y clasificación tanto de las formas como de la vegetación. Por otra parte, para los estudios vegetacionales sistemáticos, Tucker *et al.* (1986: 1342) proponen el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), de utilidad para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la vegetación (Kawabata *et al.*, 2001: 1380; Lee *et al.*, 2002: 2507).

Metodología de detección del desierto florido a partir de imágenes satelitales procesadas

En la investigación desarrollada se utilizaron imágenes satelitales y reconocimiento de terreno como instrumentos metodológicos esenciales para determinar la distribución del desierto florido y de la vegetación de niebla en el territorio circundante al Mar de Dunas de Atacama.

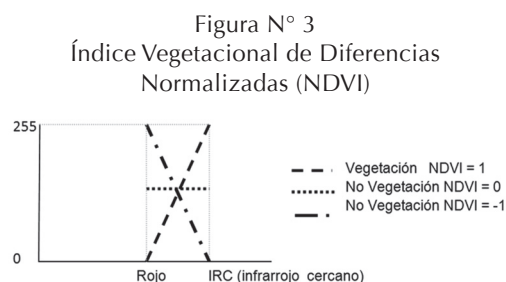
Una importante dificultad para el análisis con imágenes satelitales, es la confusión de la señal espectral de la vegetación con aquella de las arenas de las dunas y de las

coberturas eólicas presentes en gran parte del territorio en estudio. En efecto, la vegetación de niebla corresponde a especies bromeáceas cuya distribución es dispersa y sus hojas son duras y de baja reflectancia; por ello, este tipo de vegetación es perceptible en imágenes de satélite de resolución media o baja. Por su parte, las especies vegetales del desierto florido forman una cobertura vegetal más densa con especies de hojas blandas que se caracterizan por tener una alta reflectancia en el espectro visible y muy alta en el infrarrojo cercano. Considerando lo anterior, para detectar el cambio de densidad en la cubierta vegetal se utilizaron imágenes *Landsat* 5-7 y *Aster*, que corresponden a sensores de resolución media; también se utilizaron imágenes tomadas en años secos y en años húmedos.

Basándose en las diferencias de valores de reflectancia entre la banda del Rojo, que tiene mínima reflectancia por absorción de esas longitudes de onda por la clorofila, y la banda del Infrarrojo cercano, se pueden separar los píxeles que tienen vegetación de los que no tienen. Para ello se utilizó el Índice Vegetacional de Diferencias Normalizadas o NDVI cuya expresión es la siguiente:

$$NDVI = (IRC - \text{Rojo}) / (IRC + \text{Rojo})$$

Donde IRC es la cuenta digital en la banda del Infrarrojo Cercano (de 0 a 255); y Rojo es la cuenta digital en el Rojo (de 0 a 255), el gráfico de la Figura N° 3 representa los valores extremos.



Fuente: Elaboración propia.

Teóricamente, valores de NDVI mayores a 0 corresponden a vegetación; sin embargo en la realidad hay elementos cuya curva espectral también tiene un valor de Rojo menor al infrarrojo, y si ambos son altos su valor

tiende a 0 por efecto de la normalización. Por ejemplo, una diferencia de 10 entre el Infrarrojo Cercano IRC y el Rojo, con valores altos, e.g. suma de 490 da un NDVI = 0.02 y con valores bajos, e.g. suma de 30, la misma diferencia de 10 da un NDVI = 0.3 y lo más probable es que ninguno de estos píxeles sea vegetación.

De lo anterior se deduce que para aplicar este índice se debe previamente analizar el área de estudio y observar los valores mínimos y máximos que se producen en ambas bandas espectrales para los diferentes elementos que cubren la zona, por ejemplo, especies vegetales y densidad de cobertura; o bien, tipos de arena y efectos de la humedad. Dicho análisis permite determinar los rangos de las cuentas digitales que realmente corresponden a vegetación y, por ende, cuáles rangos del NDVI son válidos para separar la vegetación de otros elementos. Entonces, la fórmula se aplica con valores límites en ambas bandas.

Se analizó la imagen *Landsat* del 24 de julio de 2010, con presencia del fenómeno del desierto florido, mediante perfiles espectrales para las bandas del Rojo e IRC y se modificó la fórmula de la siguiente manera:

Al numerador (A) de la fórmula se le puso la condición de que la diferencia, que realmente representa presencia de vegetación, es mayor a 15, es decir $A = \text{Si } (IRC - \text{Rojo}) > 15$ entonces vale la expresión $(IRC - \text{Rojo})$, si no el valor es 0. Para el denominador (B), la condición controla que la suma de ambos valores no sea mayor o igual a 170 ya que suma sobre este valor normalmente es arena activa, nubes, nieve o ruido. Entonces $B = \text{Si } (IRC + \text{Rojo}) < 170$ entonces $(IRC + \text{Rojo})$ si no 0. Se verifica finalmente que el denominador (B) sea > 0 en el momento de calcular el $NDVI = A/B$ y en el caso de que B sea 0, entonces el NDVI es igual a 0.

Con el fin de llevar estos valores a un rango de 8 bits, se modificó la fórmula de la siguiente manera: $NDVI = ((A/B) + 1) * 127$. En nuestro caso, el mínimo valor válido para vegetación dio 139 y el máximo 201 (0.1 a 0.58 en valores originales). El efecto importante de este proceso es que se eliminaron automáticamente todas las confusiones de

elementos que no eran vegetación, pero que daban también valores entre 0.1 y 1.

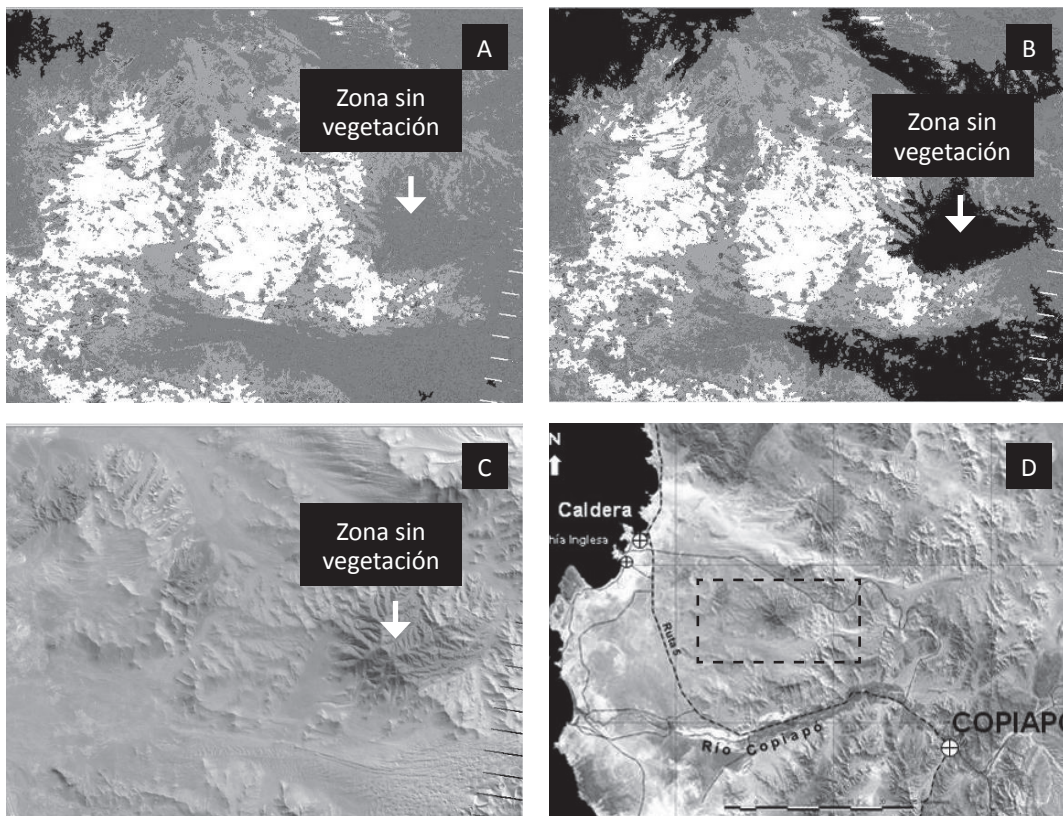
En la Figura N° 4 del área de estudio se muestra el resultado del NDVI en su versión original (A), separado en cuatro niveles de grises, donde el negro corresponde a las áreas sin vegetación y el blanco a las zonas más densas y/o fotosintéticamente más activas. Al aplicar las restricciones indicadas, el resultado cambia notablemente como se observa en (B).

Al analizar el resultado, comparándolo con la imagen original en falso color con-

vencional o composición infrarrojo color (vegetación en color Rojo), se aprecia que el resultado con la fórmula modificada se ajusta mucho más a la interpretación visual que realizaría un intérprete (Figura N° 5).

Con el fin de extraer de la imagen resultante la vegetación permanente como cultivos, praderas y matorrales presentes en el valle del río Copiapó, la cual es detectable por el sensor, se procesó la imagen del 24 de julio de 2007, que corresponde a un año seco, sin la presencia del desierto florido como se observa en la Figura N° 5.

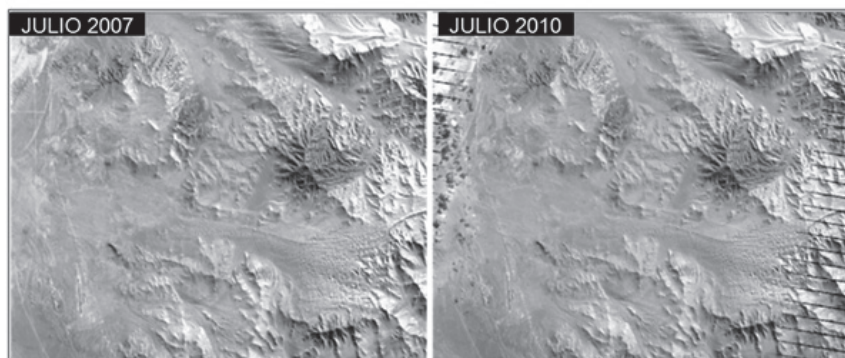
Figura N° 4
Comparación de NDVI original y modificado con la imagen original, en el área de emplazamiento del Mar de Dunas de Atacama.



A) NDVI sin modificar; B) NDVI modificado según límites espectrales de la vegetación; C) Imagen Landsat original; D) Mapa de localización área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5
Imagen satelital del territorio del Mar de Dunas con y sin desierto florido



Ausencia de desierto florido.

Presencia de desierto florido.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento indicado, se realizó el cálculo del índice vegetacional modificado, con el cual se detectó la vegetación en las áreas de cultivo y en quebradas. Al hacer la diferencia entre ambos resultados, se generan las áreas donde realmente se produce el fenómeno del desierto florido. Con el fin de integrar esta información con el resto de las coberturas tratadas en un sistema de información geográfico, se convierte el producto del procesamiento de la imagen de raster a vector (polígonos) y se aplican filtros para eliminar áreas pequeñas o menores a 5 píxeles. El resultado de esta operación se sintetiza en la Figura N° 8 que muestra la distribución del desierto florido en el área de estudio, la cual se analiza más adelante.

Metodología de identificación de la vegetación de niebla

Se efectuaron campañas de terreno donde se constató que la especie dominante es *Tillandsia landbeckii*, la cual se distribuye en grupos de plantas que se disponen alineadas; así, los campos de *Tillandsia sp.* se identificaron a partir del reconocimiento de los patrones de textura de *tillandsias* vivas y muertas, mediante el análisis visual de imágenes *Digital Globe* disponibles en *Google Earth* y validación en terreno (Figura N° 6). Se emplearon imágenes satelitales de los años 2002, 2004 y 2011, con las que se creó un fotomosaico digital. El análisis visual abarcó un cuadrante

de 40 x 40 km, equivalentes a 1.600 km², cuyas coordenadas UTM son 7.015.00 norte a 6.975.00 norte y 327.400 este a 367.400 este.

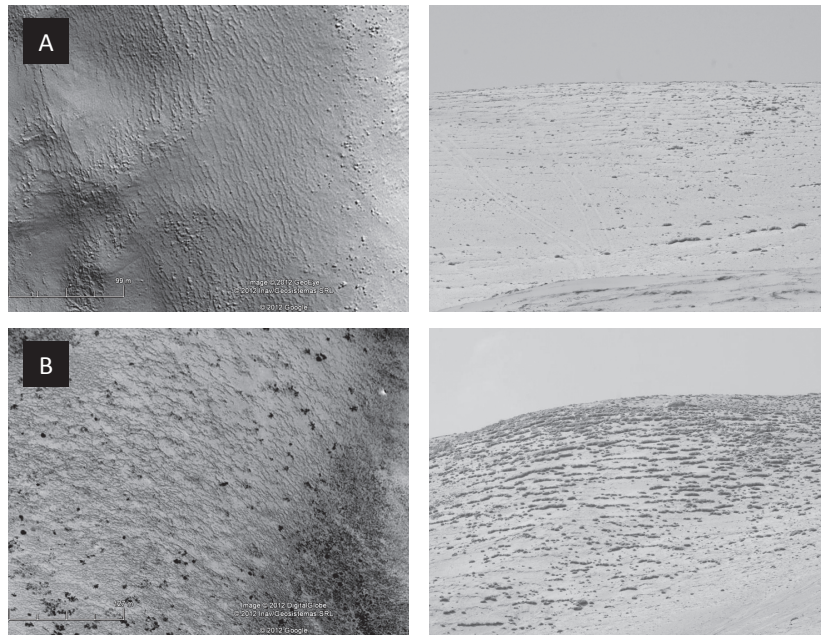
Una vez verificados los patrones texturales de los campos de *tillandsias* en terreno y en imágenes satelitales (Figura N° 6), se realizó una exhaustiva búsqueda a escala 1:5.000 de paños de *tillandsiales* en *Google Earth* y en el fotomosaico digital; así, se digitalizaron en *Arcgis* los contornos de los paños de *tillandsias*, definiendo con ellos una cobertura de polígonos. En base a esta última cobertura se realizó una serie de análisis espaciales para determinar la presencia, ausencia y frecuencia de *tillandsias*, según un Modelo de Elevación Digital SRTM, *Shuttle Radar Topographic Mission*, que se elaboró a partir de datos de radar con resolución espacial de 90 metros y cobertura global. Con dicha base topográfica se determinaron las orientaciones de laderas, altitudes y pendiente, además de las coberturas de geomorfología y formaciones superficiales generadas para la investigación (Castro *et al.*, 2013: 59).

Singularidad de la vegetación en el territorio colindante al Mar de Dunas de Atacama

El territorio en estudio, se sitúa al norte del Sitio Prioritario denominado Desierto Florido de Los Llanos, que abarca una su-

Figura N° 6

Mantos eólicos y Mar de Dunas de Atacama: patrones texturales de *tillandsias* muertas y vivas.



A) Imagen satelital y fotografía de terreno del patrón de *Tillandsias* muertas.

B) Imagen satelital y fotografía de terreno del patrón de *Tillandsias* vivas.

Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Google Earth.

perficie de 1.746 km² (Squeo *et al.*, 2008a: 37), y se localiza 29 kilómetros al sur de Copiapó. De acuerdo a los autores citados, aquí se encuentra la mayor diversidad florística y vegetal del evento esporádico del desierto florido, con 241 especies nativas, de las cuales dos de ellas presentan problemas de conservación. También, los autores citados señalan que, fuera de los límites del sitio prioritario, la presencia de flora y vegetación del desierto florido es escasa e irregular en su distribución, localizándose dispersa en llanos arenosos interiores y costeros; como ocurre con el área colindante con el Mar de Dunas que se analiza en el presente artículo.

La floración del desierto es provocada por lluvias esporádicas que permiten la germinación de plantas geófitas y de semillas en estado de latencia (Gutiérrez, J., 2008: 285), que se encuentran en los mantos de arena que cubren la superficie de las terrazas marinas y planos inclinados (Figura N° 2); dicho fenómeno también ha sido descrito en sus aspectos biogeográficos y florísticos por

Luebert *et al.*, 2006: 102; Squeo *et al.*, 2008a: 185; Squeo *et al.*, 2008b: 29. Es preciso señalar que estudios como el de Cereceda *et al.* (2000:40) demuestran que no todos los años lluviosos provocan la misma densidad de cobertura del desierto florido, como lo explica dicha autora comparando los eventos de 1991 en que se produjo mayor germinación y floración que en el evento de 1977, donde la distribución de la floración fue muy extensa ocupando hasta más al norte de las terrazas marinas de Caldera, Cuadro N° 1.

Junto a la vegetación esporádica del desierto florido, se desarrollan en el área campos dispersos de comunidades de especies que mayoritariamente pertenecen al género *Tillandsia* sp. En efecto, el farellón costero característico de la costa del norte chileno, no se encuentra en la sección sur del litoral de Atacama, lo que facilita el paso de la niebla costera, por corredores, hacia los llanos interiores de Caldera y las laderas de las serranías en Copiapó. Este es un factor esencial para la existencia de paños de *tillandsias* en

los terrenos próximos al Mar de Dunas en donde las plantas retienen parte de las arenas transportadas por el viento, formando dunas entrabadas sobre la superficie de terrazas marinas y planos inclinados aledaños al gran Mar de Dunas (Figuras N° 7 y N° 8). Dichos *tillandsiales* se encuentran mayoritariamente en el piso vegetacional del ecosistema de matorral desértico interior de Cuerno de Cabra, *Skytanthus acutus*, y de Cachiyuyo, *Atriplex deserticola*, según la clasificación de Luebert *et al.* (2006: 84).

Por su parte, los estudios tanto de Cereceda *et al.* (1999: 3) como de Pinto *et al.* (2006: 543) atribuyen la presencia de *tillandsias* al efecto de la camanchaca en sus respectivas áreas de estudio en Iquique y Arica, en el norte de Chile. También Hesse (2012:33), para explicar los extensos *tillandsiales* del desierto costero del sur de Perú, señala que su presencia depende de la humedad de la niebla en aquellas áreas donde esta ocurre con suficiente frecuencia, duración e intensidad, como se observa en el Cuadro N° 3 donde se comparan, según diferentes autores, los factores de localización de *tillandsias* en lugares como Arica, Iquique y Copiapó en Chile; y Pisco en Perú.

Caracterización de la distribución espacial del desierto florido próximo al Mar de Dunas de Atacama

Al analizar las coberturas de vegetación obtenidas a partir de las imágenes satelitales procesadas, según se explicó precedentemente en la metodología, se observa en la Figura N° 8 la distribución del desierto florido circundante al Mar de Dunas. Dicho fenómeno se presenta en los llanos cubiertos con mantos de arenas sobre las terrazas marinas más elevadas que se localizan al interior de Caldera y Bahía Inglesa. Se extiende 35 kilómetros hacia el sur hasta el valle del río Copiapó, cubriendo una superficie total de 487 km², con gran continuidad espacial.

Asimismo, de acuerdo a la Figura N° 7, se distinguen dos sectores con desarrollo del desierto florido, los cuales se disponen se-

parados por un campo de dunas semiactivo. El primer sector se sitúa entre los 300 y 700 metros sobre el nivel del mar, y se extiende al norte del camino de Los Japoneses cubriendo una superficie de 152 km². El segundo sector se localiza al sur de dicha vía y su extensión es de 273 km², llegando hasta las cercanías de la Ruta 5 y el valle del río Copiapó. Si bien este último sector se caracteriza por una floración muy continua, se destaca en su parte central la presencia de un extenso campo de dunas semiactivas que corresponden a una sección sur del Mar de Dunas. Ambos sectores de floración del desierto presentan hacia sus márgenes un cambio en la continuidad espacial, conformando un conjunto de pequeñas unidades interconectadas o individuales; esta condición se relaciona con la existencia de dunas activas, o bien de sustratos rocosos y relieves de los cerros de la cordillera de la Costa en donde el fenómeno del desierto florido se circunscribe a los fondos de pequeños valles. Las unidades pequeñas de superficie inferior a 1 km² alcanzan en conjunto aproximadamente 61 km² equivalentes al 13% del total del área donde se produce el fenómeno del desierto florido en el territorio del Mar de Dunas. Estos lugares se sitúan junto a los márgenes de las dos unidades de desierto florido en el área, ya descritos.

Asimismo, otros lugares de escasa superficie de floración del desierto, ocurren en los Llanos de Caldera; en los mantos de arenas de las terrazas marinas por debajo de los 150 metros sobre el nivel del mar, y también inmediatamente al norte de la desembocadura del río Copiapó.

Entonces, del análisis de la distribución según rangos altitudinales, se deduce que por debajo de los 100 metros sobre el nivel del mar, la presencia de vegetación del desierto florido es muy escasa y se restringe a sectores aislados de las terrazas marinas más bajas con cubiertas superficiales pedregosas.

Entre 100 y 300 metros sobre el nivel del mar, la extensión de la floración es casi continua, en los sustratos que conforman los mantos de arenas eólicas en la superficie de las terrazas marinas más altas, y también en algunos corredores del tránsito del viento hacia el interior de las serranías.

Cuadro N° 2
Síntesis de la distribución del desierto florido en torno al Mar de Dunas de Atacama

Localización	El desierto florido se extiende desde Duna Ramadas, situada al norte de Caldera, hasta la desembocadura del río Copiapó. Hacia el este de la Ruta 5 se desarrolla con continuidad espacial hasta 20 kilómetros hacia el interior. La extensión del desierto florido es esporádica en la franja entre la Ruta 5 y la costa, según se observa en la Figura N° 8.
Superficie total áreas de floración	487 km ²
Altitud	Su distribución ocurre entre los 100 y 700 metros, con mayor continuidad espacial entre los 300 y 700 metros sobre el nivel del mar.
Origen	Relacionado con la ocurrencia de lluvias ocasionales intensas, durante eventos El Niño-Oscilación del Sur, según se observa en Cuadro N° 1.
Geomorfología y formaciones superficiales	<p>La floración ocurre de preferencia sobre mantos de arenas eólicas de poco espesor y en menor medida en los sustratos pedregosos de los llanos que conforman las terrazas marinas sedimentarias, localizadas entre los 100 y 300 metros sobre el nivel del mar.</p> <p>También ocurre desierto florido en los sustratos de los depósitos aluviales y coluviales de los fondos de valles y en los planos inclinados, respectivamente, situados entre los 300 y 700 metros sobre el nivel del mar, hasta la base de los cerros de la cordillera de la Costa.</p> <p>En forma ocasional, el desierto florido puede ocurrir en algunos valles interiores altos situados a una distancia no mayor de 40 kilómetros de la costa y a una altura no superior a los 900 metros sobre el nivel del mar.</p> <p>El desierto florido también germina en los sustratos de dunas semiestabilizadas y/o estabilizadas, y también en los corredores interdunarios por donde transita el viento. Así, ocurre desierto florido en los márgenes de los campos de dunas activas y no al interior de ellos.</p>
Usos humanos y actividades en el Mar de Dunas	<ul style="list-style-type: none">-Tránsito de vehículos todo terreno.-Rutas del Raid Atacama, a través de caminos consolidados o huellas paralelas de decenas de metros de ancho.-Rutas Rally Dakar, a través de caminos consolidados o huellas.-Restos de basuras domésticas y vertedero de Caldera.- Áreas de ejercicios militares.- Instalaciones de faenas de minería extractiva

Fuente: Elaboración propia.

La vegetación de niebla y los factores de su localización en el territorio del Mar de Dunas de Atacama

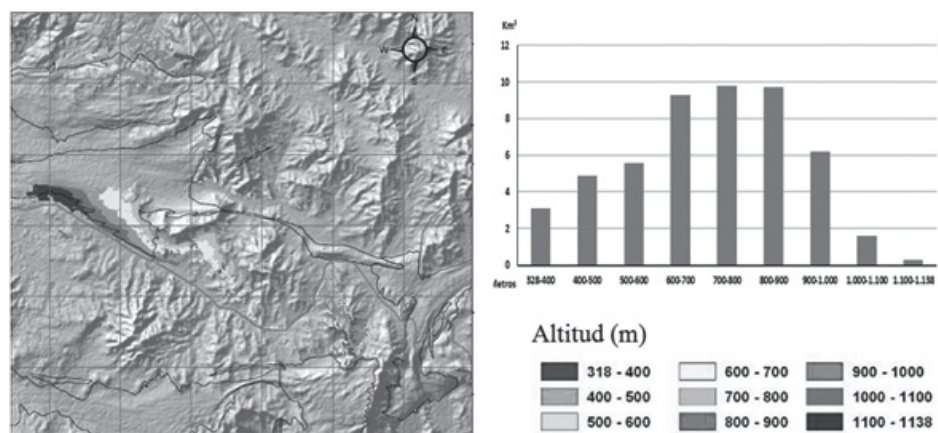
Utilizando la metodología expuesta precedentemente, se identificaron 211 paños de vegetación de niebla en el territorio aledaño al Mar de Dunas, los que en conjunto constituyen 54 km² de comunidades vegetales

monoespecíficas de *Tillandsia Landbeckii*. Según se observa en la Figura N° 8, los campos de *tillandsias* localizados más al oeste se encuentran a 18 kilómetros del borde costero y los más distantes se sitúan a no más de 50 kilómetros de este.

En el entorno inmediato de las grandes dunas se localizan dos extensos paños de *tillandsias*; el primero se sitúa en el sector norte, unos 20 kilómetros al interior de la localidad

Figura N° 9

Superficie cubierta por *tillandsias sp.*/Rango Altitudinal alrededor del Mar de Dunas de Atacama



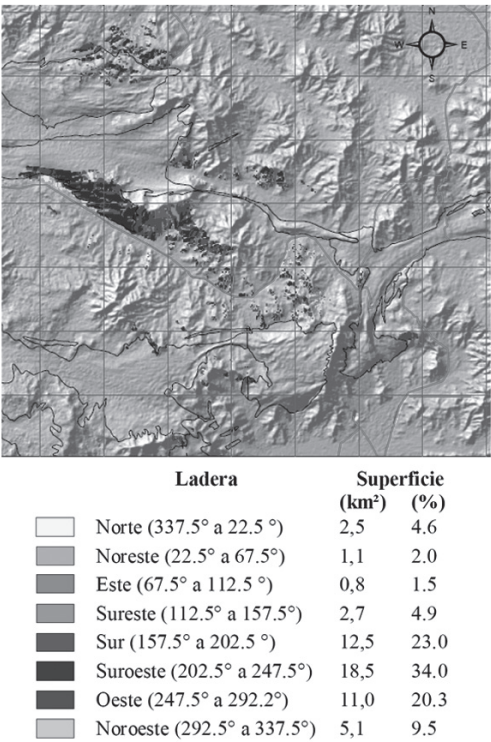
Fuente: Elaboración propia a partir de Modelo Digital de Elevación.

del oeste y suroeste, según los registros del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile. En el área de estudio se observa que 77,3% de la superficie de *tillandsiales* se localiza en laderas expuestas a vientos provenientes del oeste, suroeste y sur, como se observa en la Figura N° 10. Así, las laderas de orientación suroeste, expuestas a la dirección de los vientos dominantes, alcanzan el mayor porcentaje de extensión de *tillandsias*. En consecuencia, el control topográfico es también un factor que condiciona la distribución espacial de esta especie vegetal, como también lo establece Hesse (2012:36) para los *tillandsiales* situados entre Pisco y Acarí, en Perú.

De acuerdo a los resultados de otros autores en sus investigaciones sobre *tillandsias*, se puede determinar que la distribución latitudinal de *tillandsiales* en el desierto costero de América del Sur abarca desde los 13°S en Perú, según Hesse (2012: 34). En el Norte Grande de Chile, los *tillandsiales* situados en las serranías costeras de Iquique (20°S), son caracterizados por Cereceda (1999: 8-9). Así mismo, los campos de *tillandsias* situados en las quebradas entre Arica (18°S) y el río Loa (21°S), son estudiados por Pinto *et al.* (2006: 546-547). Por su parte, el presente estudio establece que dichas comunidades vegetales del desierto costero nuboso, también se encuentran a los 26°S en su distribución más austral, según se observa en el Cuadro N° 3.

Figura N° 10

Territorio del Mar de Dunas de Atacama, orientación de laderas



Fuente: Elaboración propia a partir de modelo digital de elevaciones SRTM.

Cuadro N° 3
Síntesis comparativa de los factores de localización de *Tyllandsia Landbeckii* en el desierto costero del norte de Chile y sur del Perú

Factores de distribución	Cereceda <i>et al.</i> , 1999	Pinto <i>et al.</i> , 2006	Hesse, 2012	Castro <i>et al.</i> , 2012
Lugar y latitud	Cerro Guatalaya, Iquique 20°17'S	Arica-río Loa 18°20'S-21°25'S	Pisco-Acarí, Perú 13°40'S-15°37'S	Caldera-Copiapó 26°58'S-27°20'S
Altitud (m)	500-1.000	900 -1.200	467 - 1.129	328 - 1.138
Superficie con <i>tillandsia landbeckii</i>	-	68,6 km ²	605,8 km ²	54,3 km ²
Superficie área de estudio	-	-	15.777 km ²	1.600 km ²
Orientación predominante de laderas	Oeste	Suroeste y oeste	Oeste y suroeste	Suroeste y oeste
Distancia máxima a línea de costa	16 km	45 km	65 km	50 km
Geomorfología y Topografía	Laderas cerros	Laderas de quebradas profundas; Llanos arenosos	Lomas	Llanos y planos inclinados
Substrato	Arenas eólicas	Arenosos	-	Mantos arenosos

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de la vegetación singular y la zonificación del territorio del Mar de Dunas

Las coberturas de los campos de *tillandsias* y del desierto florido obtenidas, se relacionaron en un sistema de información geográfico, con el fin de integrar los resultados de localización de la vegetación singular existente en el área de estudio. Un primer aspecto a destacar, según se observa en la Figura N° 11, es que dicha vegetación se emplaza en diferentes espacios próximos al Mar de Dunas y que hay escasa superposición espacial de ambas, siendo únicamente los fondos de valles y quebradas los lugares de emplazamiento común para las *tillandsias* y el desierto florido.

Por debajo de los 700 metros sobre el nivel del mar, según se observa en la Figura N°

11, alternan los espacios ocupados por dunas activas con amplias depresiones interdunarias por donde circula el viento; los substratos corresponden a mantos de arena estabilizados por la vegetación permanente del ecosistema de matorral desértico interior citado precedentemente, y en donde ocurre el desierto florido cuando las condiciones de humedad son propicias.

Los paños de *tillandsias*, en tanto, se ubican en el sector norte del camino Los Japoneses que atraviesa las serranías de la cordillera de la Costa donde se emplaza el Mar de Dunas. Aquí, las cubiertas eólicas y las dunas de diversas morfologías (Castro *et al.*, 2012: 9) cubren parcialmente los cerros, y los *tillandsiales*, que estabilizan parcialmente las dunas, deben su localización a la orientación favorable de las laderas para interceptar la niebla costera y a la topografía con pendientes de hasta 15°.

Figura N° 11



123) y natural presentado en el marco del presente artículo, suscita una demanda turística significativa en la zona costera siendo reconocida por el Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR, 2011) al determinar 32 atractivos turísticos de diferente jerarquía entre el granito orbicular por el norte y la playa Puerto Viejo por el sur. Dichos atractivos se agrupan en el área turística prioritaria “Caldera-Bahía Inglesa” (SERNATUR, 2011: 18). De igual forma, varios de dichos atractivos turísticos se ubican en terrenos al interior de Bienes Nacionales protegidos, como figura de protección de predios fiscales (Ministerio de Bienes Nacionales), el cual procura la conservación ambiental y el manejo sostenible de recursos en predios fiscales.

Si bien las áreas turísticas prioritarias no son un instrumento de planificación territorial, ellas permiten espacializar la gestión de SERNATUR, por lo que el área de desierto florido identificada podría ser catalogada como atractivo de jerarquía internacional, de acuerdo a la jerarquía de atractivos turísticos de SERNATUR (2011), titulado "Homologación y Actualización de Bases Georreferenciadas de Atractivos Turísticos para el SIG Sernatur"; tal es el caso del área de desierto florido de

En el sector del desierto de Atacama en estudio, su reconocido valor geopatrimonial (Castro *et al.*, 2011: 52; Castro *et al.*, 2012:

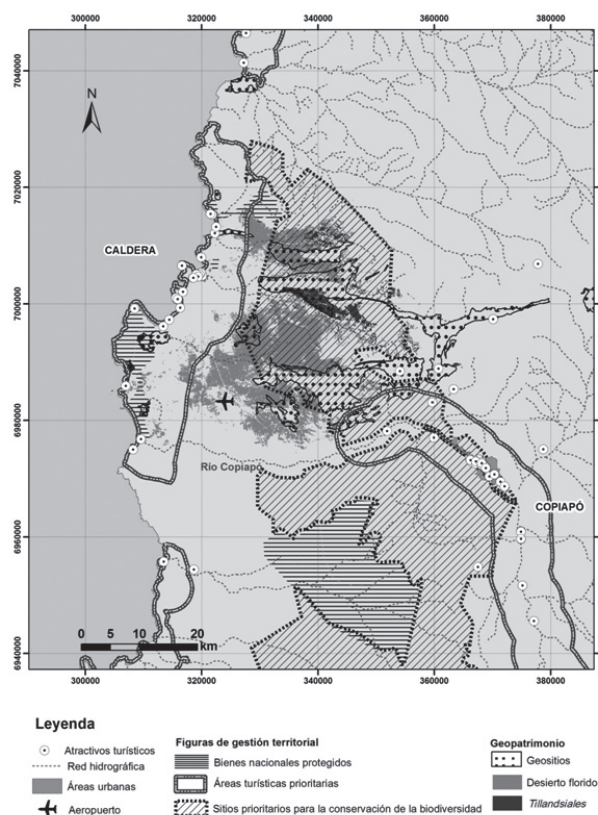
Llanos de Caldera, situada al sur del río Copiapó; como también, ser incluida dentro del área turística prioritaria “Caldera-Bahía Ingle-sa” (Figura N° 12).

El valor ecológico del área en estudio, es reconocido por el Ministerio de Medio Ambiente mediante la declaración del Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad “Desierto florido” (Ministerio del Medio Ambiente, 2012), el cual incluye prácticamente la totalidad de los *tillandsiales* identificados; sin embargo, en dicho espacio no se consideran los sectores de desierto florido identificados en la presente investigación, como por ejemplo en torno al aeropuerto de Copiapó (Figura N° 12), en el sector de Monte Amargo, al sur del área de estudio, área que, por lo demás, es identificada por Squeo *et al.*,

2008b; y Squeo *et al.*, 2008c, como futuro sitio prioritario de conservación de la biodiversidad dada la presencia de especies nativas de flora vulnerables y en peligro.

De acuerdo a lo expuesto en el área del Mar de Dunas de Atacama y su entorno, se reconoce la existencia de una superposición espacial de figuras de conservación y desarrollo turístico. Dichas áreas son susceptibles de ser redelimitadas al tomar en consideración los nuevos antecedentes aportados por este artículo; con ello, se procura favorecer el ámbito espacial de la toma de decisiones en materias de planificación y gestión del territorio; y en particular, la conservación del patrimonio natural que puede sustentar actividades recreativas, científicas, educativas y de conservación.

Figura N° 12
Figuras de gestión y ordenación territorial, Caldera-Copiapó, 27°S, Atacama



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La distribución espacial del desierto florido y de la vegetación de niebla en el área de estudio está fuertemente condicionada por las estructuras geomorfológicas. En efecto, en las llanuras con sustratos arenosos correspondientes a las terrazas marinas y los piedemontes por debajo de los 700 metros sobre el nivel del mar, germina el desierto florido. La vegetación de niebla, en cambio, se distribuye en los fondos de valles y laderas de orientación sur y oeste de las serranías de la cordillera de la Costa entre los 700 y 1.100 sobre el nivel del mar. El grado de estabilización de los sustratos arenosos es otro factor condicionante ya que, en aquellos sustratos de escasa movilidad o estabilizados, germina el desierto florido y la vegetación de niebla, no así sobre las acumulaciones eólicas activas del Mar de Dunas de Atacama. Asimismo, no se observa desarrollo de vegetación en los sectores desprovistos de mantos eólicos.

El procesamiento de imágenes satelitales a partir del cálculo del Índice Vegetacional de Diferencias Normalizadas (NVDI) constituye un método eficiente para la determinación de la distribución de tipos de vegetación en ambientes desérticos con sustratos arenosos. Al mismo tiempo, es un complemento a los métodos tradicionales de reconocimiento de patrones texturales de la vegetación obtenidos a través de fotografías aéreas, imágenes y observaciones de terreno. En cuanto al establecimiento de la delimitación de los contornos de los mares de arenas, son concordantes los resultados obtenidos utilizando los métodos de observación convencionales, con aquellos obtenidos a partir de percepción remota espacial, todo lo cual ratifica la eficiencia y utilidad de esta última.

La definición de la distribución espacial de la vegetación de niebla y del desierto florido permite establecer áreas y delimitaciones naturales muy claras y acotadas en el territorio en estudio; dichos sitios coinciden con la localización de otros elementos del geopatrimonio en torno al Mar de Dunas de Atacama, y también, con algunas figuras de protección como los Sitios Prioritarios de Atacama o las áreas propuestas por los autores como Geositios en trabajos anteriores. En conjunto, todos estos elementos potencian el valor de dicho territo-

rio y a la vez, determinan su fragilidad natural para acoger diversas actividades y usos humanos. En consecuencia, los resultados obtenidos contribuyen a los procesos de ordenamiento y gestión del territorio de la Tercera Región, los cuales deben difundirse y darse a conocer en los distintos servicios regionales para ser considerados en los estudios de elaboración de los planes regionales de desarrollo.

Finalmente, se continuará con la divulgación científica de los resultados obtenidos en las instancias científicas, administrativas, políticas y educacionales que corresponda, con el fin de promover, ante UNESCO, la solicitud de la nominación de la categoría de Geoparque para dicho territorio del sur del desierto de Atacama.

Referencias Bibliográficas

- ARAYA-VERGARA, J. Los Ergs del desierto marginal de Atacama, Chile. *Revista Investigaciones Geográficas Chile*, 2001, N° 35, p. 27-66.
- BARREDO, J.I. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación multicriterio*. Madrid: Editorial Ra-Ma, 1996.
- BORTHAGARAY, A.I.; FUENTES, M.E. & MARQUET, P.A. Vegetation pattern formation in a fog-dependent ecosystem. *Journal of Theoretical Biology*, 2010, N° 265, p. 18-26.
- CASTRO, C. Geositios de valor patrimonial en Isla Grande de Atacama. En: GOBIERNO DE CHILE; GEF MARINO y PNUD. *Áreas marinas y costeras protegidas de múltiples usos*. Santiago de Chile: Ocho Libros Ediciones, 2007, p. 110-115.
- CASTRO, C.; PATTILLO, C. y ZÚÑIGA, A. Mar de Dunas de Atacama, Copiapó: geopatrimonio y desarrollo territorial. En: PRIMER SIMPOSIO SOBRE GEOPARQUES. *Actas*. Melipeuco: Actas del primer simposio sobre geoparques, 2011, p. 52-55.
- CASTRO, C.; PATTILLO, C. y ZÚÑIGA, A. Geomorfología y geopatrimonio del Mar de Dunas de Atacama, Copiapó (27°S) Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2012, N° 53, p. 123-136.

CASTRO, C.; PATTILLO, C.; RIVERA, J. y ZÚÑIGA, A. Valoración territorial del geopatrimonio de la zona costera del sur del Desierto de Atacama, Chile (27°S). *Investigaciones Geográficas*, 2013, 45, p. 51-72.

CASTRO, C.; PATTILLO, C. y ZÚÑIGA, A. Radiometría de campo en zonas costeras: el sistema geomorfológico de la bahía de Tongoy (30° 15' S), Chile. *Terra Australis*, 2005, N° 50, p. 17-31.

CERECEDA, P.; LARRAÍN, H.; OSSES, P.; LAZARO, P.; GARCÍA J.L. y HERNÁNDEZ, V. El factor clima en la floración del desierto en los años "El Niño" 1991 y 1997. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2000, N° 27, p. 37-52.

CERECEDA, P.; LARRAÍN, H.; LÁZARO, P.; OSSES, P.; SCHEMENAUER, R.S. y FUENTES, L. Campos de tillandsias y niebla en el desierto de Tarapacá. *Revista de Geografía Norte Grande*, 1999, N° 26, p. 3-13.

GUTIÉRREZ, J. El Desierto Florido en la Región de Atacama. En: SQUEO, F.A.; ARANCIO, G. y GUTIÉRREZ, J.R. *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. La Serena: Ediciones Universidad de La Serena, 2008, p. 285-291.

HESSE, R. Spatial distribution of and topographic controls on Tillandsia fog vegetation in coastal southern Peru: Remote sensing and modeling. *Journal of Arid Environments*, 2012, N° 78, p. 33-40.

KAWABATA, A.; ICHII, K. & YAMAGUCHI, Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *Journal of Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, N° 7, p. 1377-1382.

KOCUREK, G.; RYAN, C. & EWING, R.C. Aeolian dune field self-organization, implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. *Geomorphology*, 2005, N° 72, p. 94-105.

LIVINGSTONE, I.; GILES, F.; WIGGS, C. & WEAVER, M. Geomorphology of desert sand

dunes: A review of recent progress. *Earth-Science Reviews*, 2007, N° 80, p. 239-257.

LEE, R.; YU, F.; PRICE, K.; ELLIS, J. & SHI, P. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. *Journal of Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, N° 12, p. 2505-2512.

LUEBERT, F. y PLISCOFF, P. *Sinopsis Bioclimática y Vegetacional de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 2006.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. *Infraestructura de datos espaciales. Servicios de mapas del Ministerio del Medio Ambiente*. Chile: Sinia, 2012.

MURRAY, G. *Geodiversity*. London, England: Ed. Wiley, 2004.

PASKOFF, R.; CUITIÑO, L. y MANRÍQUEZ, H. Origen de las arenas dunares de la región de Copiapó, Desierto de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 2003, Vol. 30, N° 2, p. 355-361.

PINTO, R.; BARRÍA, I. & MARQUET, P.A. Geographical distribution of Tillandsia lomas in the Atacama Desert, northern Chile. *Journal of Arid Environment*, 2006, N° 65, p. 543-552.

SAATY, T.L. & GONZÁLEZ, L. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston: Kluwer Academic, 2001.

SERVICIO METEOROLÓGICO DE LA ARMADA DE CHILE. *Anuarios Meteorológicos Capitanía de Puerto de Caldera*. Santiago de Chile: Directemar, 2005; 2006; 2007; 2008; 2009 y 2010.

SQUEO, F.A.; ARANCIO, G.; LETELIER, L.; LÓPEZ, D. y ESTÉVEZ, R.A. Antecedentes de los sitios prioritarios para la Conservación de la Flora Nativa Amenazada de la Región de Atacama. En: SQUEO, F.A.; ARANCIO, G. y GUTIÉRREZ, J.R. *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. La Serena: Ediciones Universidad de La Serena, 2008a, p. 185-200.

SQUEO, F.A.; ARANCIO, G.; LETELIER, L.; ARROLLO, M.; LEÓN LOBOS, P. y RENTERÍA-ARRIETA, L. Flora Amenazada de la Región de Atacama y Estrategias para su Conservación. En: SQUEO, F.A.; ARANCIO, G. y GUTIÉRREZ, J.R. *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. La Serena: Ediciones Universidad de La Serena, 2008b, p. 29-44.

SQUEO, F.A.; LETELIER, L.; ESTÉVEZ, R.A.; CAVIERES, L.; MIHOC, M.; LÓPEZ, D.; y ARANCIO, G. Definición de los Sitios prioritarios para la conservación de la flora nativa de la región de Atacama. En: SQUEO, F.A.; ARANCIO, G. y GUTIÉRREZ, J.R. *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. La Serena: Ediciones Universidad de La Serena, 2008c, p. 152-153.

TUCKER, C.J. & SELLERS, P.J. Satellite remote sensing of primary production. *Journal of Remote Sensing*, 1986, Vol. 7, N° 11, p. 1395-1416.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). *Global geoparks network. Guidelines and Criteria for national geoparks seeking UNESCO's assistance to join the Global Geoparks Networks*. Paris: UNESCO World Heritage Centre, 2008.

SERVICIO NACIONAL DE TURISMO (SERNATUR). *Zonas y Centros de Interés Turístico Nacional. Antecedentes básicos para una Estrategia de Ordenamiento Territorial*. Santiago de Chile, Sernatur, 2007.

SERVICIO NACIONAL DE TURISMO (SERNATUR). *Áreas turísticas prioritarias de Chile*. Santiago de Chile: Sernatur, 2011.

