METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE NUBES ESTRATOCUMULOS MEDIANTE PERCEPCION REMOTA, CON ENFASIS EN SU PENETRACION EN EL DESIERTO COSTERO DE TARAPACA.[1]

MARTIN FARIAS[2], MARCELO LAGOS[2], PILAR CERECEDA[2], HORACIO LARRAIN[3], PABLO OSSES[2], RAQUEL PINTO[4], RODRIGO NÚÑEZ[2].

Resumen

Se analiza el comportamiento espacio-temporal de nubes estratocúmulos generadas en el océano Pacífico suroriental, sus corredores de penetración en parte del desierto de Tarapacá (19° 48' a 22° 00' Lat. S y 69° 00' a 71° 00' Long. W) y la influencia que presenta el relieve del farellón costero en esta penetración.

El estudio se realiza para el período otoño-invierno de 2001 y la metodología consiste en la combinación del procesamiento digital de imágenes satelitales con la modelación numérica de terreno. Imágenes GOES son utilizadas en el análisis espacio-temporal cada 90 minutos y de este modo se identifican las zonas de mayor frecuencia y de mayor permanencia de este tipo de nubes, así como el comienzo, desarrollo y término de cada evento analizado. Además se utilizan imágenes NOAA junto al modelo digital de elevación en la delimitación y caracterización del relieve de los corredores de penetración.

El procesamiento de las imágenes se fundamenta en la elaboración de algoritmos de discriminación de nubes bajas. Para ambas imágenes el enfoque se basa en la clasificación de categorías mediante *umbrales espectrales* y en el concepto *detección de cambios*, para lo cual se procesan también imágenes sin presencia de nubes como referencias.

En esta oportunidad se muestra la metodología de análisis utilizada y se presentan algunos resultados preliminares.

Abstract

The spatial and temporal behaviour of stratocumulus clouds generated in the Southeast Pacific Ocean is analysed, specially its penetration through some corridors from the sea to the desert of the Tarapacá Region (19° 48' to 22° 00' S. Lat. and 69° 00' to 71° 00' W. Long.) and the influence of the relief in this penetration.

The study is done for the autumn and winter of year 2001 and the methodology combines satellite data processing and the digital elevation model (DEM) of the study area. GOES images are used for the spatial and temporal behaviour every 90 minutes allowing the identification of the most frequent and permanent areas covered by low clouds, in addition to the analysis of every event detected. Also NOAA images are used in combination with the DEM to characterize the relief of the penetration corridors.

The image processing is based on the discrimination of low clouds by means of spectral thresholds and change detection, working also with images free of clouds as references.

This paper points out the analysis methodology used and some preliminary results are shown.

---

[1] El presente artículo corresponde a resultados parciales de la investigación "La importancia de la niebla y de la lluvia en ecosistemas de oasis de niebla en el desierto costero de Tarapacá con especial énfasis en la vegetación y entomofauna". FONDECYT 1010801 – año 2001.

[2] Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía.

[3] Universidad Arturo Prat.

[4] Bióloga

Antecedentes

Desde julio del año 1997 se está llevando a cabo una investigación interdisciplinaria en el desierto de la Primera Región de Tarapacá, específicamente entre Pisagua y la desembocadura del Río Loa. Comprende el litoral, la cordillera de la Costa y la Pampa del Tamarugal. El proyecto Fondecyt 1971248 tuvo por objetivo principal conocer el origen y comportamiento de la niebla. Esta investigación fue de carácter básico y contempló como objetivo principal estudiar los factores que determinan la presencia de nieblas de radiación, orográficas y advectivas; intentando conocer la dinámica de penetración continental de esta última. Durante el año 2000, a través del proyecto Puente 2000-04PF, se continuaron las mediciones de colección de agua de niebla y de registros de flora y fauna. A la luz de los resultados obtenidos en dichos proyectos se amplía el espectro de la investigación en el proyecto Fondecyt 1010801, donde se pretende conocer la dinámica de los estratocúmulos, de la niebla y sus manifestaciones en los ecosistemas desérticos, específicamente en la flora y entomofauna de oasis de niebla.

La niebla se estudia en Chile y en el mundo debido a sus potencialidades como un recurso hidrológico susceptible de ser utilizados por la población de las áreas desérticas y semidesérticas que sufren de escasez de agua potable, y también en su aporte hídrico a los ecosistemas que logran subsistir en dichas zonas.

Entre los años 1997 y 2000 se constató en el litoral, una colección de agua de niebla de 8.5 L/m^2/día como promedio anual del período, la mejor captación hecha en Chile por el grupo de estudio. Asimismo, asociadas a estas investigaciones se tuvo la oportunidad de trabajar la vegetación en un área de tillandsias ubicada en el cerro Guatalaya (Cereceda et al., 1999) y en el oasis de Alto Patache se hizo un seguimiento exhaustivo de la entomofauna, encontrándose una riqueza de insectos nunca antes registrada en el área (Larrain et al., 1999). A su vez, la bióloga Raquel Pinto hizo un estudio de la floración del desierto costero en el año El Niño de 1997/1998 (Pinto, R. 1999).

La metodología utilizada en el primer proyecto permitió reconocer los factores determinantes de la presencia de niebla en el área de estudio y la producción potencial de agua en algunos sectores del litoral y del interior. Asimismo, permitió formular teorías sobre la importancia del relieve en la penetración de la niebla (Cereceda, et al, 2001). Sin embargo, si bien el análisis de la vegetación entregó antecedentes que permitieron, en alguna medida, corroborar dichas hipótesis, el método de campañas de medición de datos meteorológicos y de colección de agua mediante neblinómetros a lo largo de corredores de penetración, no permitió comprobar los postulados expuestos.

Por esta razón, el proyecto actual contempla como uno de sus objetivos principales el estudio de la nube estratocúmulo generada en el océano y de las nubes orográficas del litoral mediante el uso de sensores remotos. Así se pretende realizar un análisis espacial y temporal de los estratocúmulos mediante imágenes GOES y NOAA.

En esta oportunidad se entregan las bases metodológicas del análisis espacio-temporal de nubes estratocúmulos mediante la utilización de imágenes de satélite y modelos digitales de terreno, además de dar a conocer algunas posibilidades de esta aplicación.

Sensores Remotos

En la actualidad las ventajas de la observación espacial radican en la cobertura global y periódica de la superficie terrestre; su visión panorámica; información sobre regiones no visibles del

espectro y su formato digital que facilita su procesamiento e integración con otras fuentes de información geográfica.

En Chile, escasos son los estudios relacionados con la cobertura espacial de los estratocúmulos en base a sensores remotos y prácticamente no hay investigaciones en comportamiento temporal. En 1993 J. P. Ramírez realizó una propuesta metodológica para la detección de nieblas basada en imágenes GOES, determinando en que bandas espectrales se destacan tipologías de nubes. La desventaja de este estudio radica en que la interpretación de las imágenes fue visual y no digital.

Quizás el científico que ha avanzado más en las técnicas satelitales es el Dr. Jôrg Bendix (Instituto de Geografía, Universidad de Bonn), quien además dirige un Grupo de Estudios de Niebla y Sensores Remotos. El ha realizado importantes estudios en la región Alpina como el valle del Río Po mediante NOAA-AVHRR. Su método se basa en una serie de cálculos de las propiedades de la niebla (albedo y profundidad óptica). La detección de la niebla en estos estudios se hizo mediante las diferencias de temperatura entre las bandas de infrarrojo medio y térmico. Los resultados se verificaron mediante estaciones meteorológicas convencionales y un sistema de monitoreo de terreno especialmente instalado para estos efectos. Además determinan mapas de extensión vertical de las nieblas; tope de nube en base a la combinación de radiosondeo y modelos digitales de elevación; visibilidad y contenido de agua; y discriminación entre nieblas de tipo advectivo y de radiación (Bendix, J., Bachman, M. 1993; Bendix, 1995).

Area de estudio

El área de estudio (figura 1) se localiza en el norte de Chile, en el desierto de la Región de Tarapacá. Se enmarca entre los 19º48'-22º00' Lat. S y los 69º00'-71º00' Long. W, lo que corresponde a 57.500 km^2, donde un 57% pertenece a masa continental y un 43% a superficie oceánica.

En el litoral, teniendo su inicio al sur de Pisagua, se extiende 277 km a lo largo de la línea de costa, pasando por la desembocadura del Río Loa, hasta terminar cerca de Tocopilla. Transversalmente, desde las angostas planicies costeras se prolonga aproximadamente 118 km hasta la Pampa del Tamarugal.

El relieve predominante se caracteriza por la presencia de un continuo farellón costero, con alturas promedio entre 400 y 1.000 m. Hacia el interior, la cordillera de la Costa se manifiesta con altitudes máximas entre los 1.500 y 2.000 metros y atravesando ésta, la Pampa del Tamarugal se emplaza en la Depresión Intermedia y se constituye principalmente por un gran glacis de sedimentación donde las menores altitudes alcanzan los 740 m.

Es importante considerar que las importantes altitudes alcanzadas por el farellón costero y la cordillera de la Costa, tienen una implicancia constante en la intercepción del nivel de subsidencia atmosférica y con ello la presencia de un techo permanente de nubes y niebla que caracterizan climáticamente al desierto costero como un área de alta humedad atmosférica y nubosidad (IGM,1985).

Metodología

La metodología consiste básicamente en la modelación numérica de terreno del área de estudio, en combinación con el procesamiento digital de imágenes satelitales. La modelación numérica se utiliza para el análisis y cartografía de los corredores de penetración, mientras que el

procesamiento de imágenes permite discriminar la cobertura de nubes bajas como elemento principal.

a) Modelo digital de elevación

El modelo digital de elevación (MDE) se realiza en base a la digitalización de las curvas de nivel, cotas y drenaje de la cartografía IGM escala 1:250.000, correspondiente a las cartas: Pisagua, Iquique y Quillagua. La información vectorial es ingresada a un sistema de información geográfica (SIG), donde se genera un MDE raster con tamaños de celda de 250 m.

Una vez realizado el MDE, además de los cálculos de pendiente y exposición, se elaboran vistas en dos y tres dimensiones con diferentes orientaciones (figura 2), de manera de destacar las características del relieve y su relación con el comportamiento espacial de la nube.

b) Imágenes satelitales

Las imágenes utilizadas para discriminación de nubes bajas, medias y altas, son GOES-GVAR (Geostationary Operational Environmental Satellite-Goes Variables) y NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer). Las primeras imágenes son adecuadas para una escala cartográfica 1:5.000.000 mientras que las segundas se utilizan para una escala cartográfica 1:1.000.000.

El procesamiento de las imágenes se fundamenta en la elaboración de algoritmos de discriminación de nubes bajas. Para ambas imágenes el enfoque se basa en la clasificación de categorías mediante *umbrales espectrales* y en el concepto *detección de cambios*, por lo que también se procesan imágenes sin presencia de nubes como referencias. Este procesamiento se realiza desde mayo del presente año y se extenderá por 24 meses.

c) Análisis espacio temporal

El análisis del comportamiento espacio-temporal de la cobertura de nubes bajas, se realiza con los resultados del procesamiento de imágenes GOES cada 1½ hora, utilizando para comportamientos más dinámicos, imágenes cada 30 minutos.

Con estas imágenes se realizan los siguientes análisis:

c1) Comportamiento diario. En cada imagen procesada se determina el área cubierta por estas nubes con el propósito de conocer los eventuales ciclos diarios, especialmente las horas de menor y mayor expansión. Además se busca identificar y caracterizar espacio-temporalmente eventos advectivos, orográficos y radiativos.

c2) Comportamiento semanal. La base de este análisis es el cálculo de frecuencia de presencia de estratocúmulos, cuyos resultados se compararán con las captaciones de agua semanales que se realizan en tres estaciones del área de estudio.

c3) Comportamiento mensual. Basados en el mismo cálculo anterior, determinado mensualmente, se estudiarán los eventuales cambios estacionales y desplazamientos de estratocúmulos a lo largo del año.

c4) Comportamiento anual. Con el cálculo de frecuencia de presencia, ahora anualmente determinado, se compararán los dos años abarcados en el estudio.

c5) Identificación de corredores. Para cada evento advectivo se identifican los corredores de penetración en el farellón costero y aquellos interiores que atraviesan la cordillera de la Costa hacia la Pampa del Tamarugal.

d) Análisis de relieve de los corredores

El análisis de relieve de los corredores, se basa en los resultados del procesamiento de imágenes NOAA y en la modelación numérica de terreno. Se utilizan estas imágenes por tener una resolución espacial mayor que GOES, pero con la desventaja que su frecuencia de observación es de cada 6 horas (dos satélites), lo que limita la coincidencia de observación y presencia de estratocúmulos en los corredores, especialmente en el caso de los que permiten el paso de nubes desde el mar hacia la cordillera de la costa.

La cobertura de nubes bajas determinada en cada imagen NOAA se sobrepone al MDE dejando la información de relieve solamente en aquellos sectores cubiertos, realizando entonces los análisis de altitudes, exposición y pendientes de ellos. Analizando además el borde del área cubierta, permite determinar la altitud en que el tope de nube baja hace contacto con el relieve transformándose por consiguiente en niebla.

Resultados preliminares

a) Análisis espacio-temporal

La figura 3 muestra el desarrollo de un evento advectivo que comienza el día cuatro de agosto a las 17:45 GMT y termina a las 14:45 GMT del día siguiente. Durante el inicio se aprecian todavía signos de un evento orográfico previo, producido en algunos sectores cercanos a la desembocadura del Río Loa. A las 20:45 GMT se observa la presencia de nubes bajas penetrando el farellón costero en 5 corredores, las que avanzan alcanzando la Pampa del Tamarugal a las 05:45 GMT. En la secuencia de imágenes se aprecia que el máximo de cobertura de nubes bajas se produce a las 11:45 GMT, con un área continental cubierta por ellas de alrededor de 12.000 km^2. A partir de esta hora empieza la etapa de disipación quedando a las 14:45 GMT todavía residuos en el interior y sobre el farellón costero.

En base a imágenes cada 11/2 hora, para este evento se realizó un cálculo de frecuencia de presencia de estratocúmulos cuyo resultado se muestra en la figura 4. Estos resultados señalan que, en el continente, la mayor frecuencia se produce precisamente en los corredores del farellón costero con valores de permanencia sobre el 75% del tiempo que duró el evento, destacándolos como potenciales lugares para captación de agua.

También para cada imagen se cuantificó tanto el área como la altitud media de las zonas cubiertas por nubes cuyos resultados se encuentran en la figura 5. Un análisis de ambas curvas al inicio del evento, demuestra que se estaba en presencia de un evento orográfico ya que la presencia de nubes en una pequeña área pero con altitudes medias cercanas a los 750 metros, nos revela su posición sobre algunos cerros altos. Una hora y media más tarde, la altitud media es menor mientras que el área cubierta es mayor denotando que el efecto orográfico está terminando y el advectivo está comenzando. A las 16:45 hora local, el aumento positivo de pendiente de ambas curvas, se interpreta como el avance rápido de las nubes a través de los corredores del farellón costero, aumentando tanto el área como la altitud media de las zonas cubiertas. Desde esa hora se presenta un aumento gradual en ambas variables hasta el inicio del día 5 de agosto, momento en que nuevos cambios de pendiente se observan en las curvas, cuyo significado se puede interpretar como que las nubes han llegado a la Pampa del Tamarugal y

comienzan a avanzar en forma rápida hacia sus partes deprimidas. Los máximos de área y de altitud media se producen para este evento a las 07:45 hora local, momento en que comienza una declinación conjunta, la que se acelera una hora y media más tarde finalizando el evento después de las 10:45 hora local.

Una interrogante que resulta de este evento, es el efecto que permite mantener importantes residuos en la Pampa del Tamarugal. Quizás en esa zona existe en efecto de reforzamiento de origen radiativo.

b) Corredores de penetración

Basados en el análisis espacio-temporal la figura 6 identifica siete corredores de penetración en el farellón costero. El comportamiento del estratocúmulo en cada uno de ellos es particular evidenciando la influencia del relieve y condiciones meteorológicas. Con una altitud promedio de 660 m, éstos corredores presentan magnitudes de penetración continental claramente influenciadas por las características de la topografía, donde la profundidad de impacto de la masa nubosa se potencia en áreas más deprimidas. La tabla 1 localiza cada uno de los corredores. Sólo algunos de estos corredores presentan características morfológicas que permiten el avance del estratocúmulo hacia el interior a través de la cordillera de la Costa, es el caso de los corredores nº 3,4,5 y 6.

Por otra parte, en la tabla 2 se localizan corredores interiores que conectan la masa nubosa con la Pampa del Tamarugal. Se puede observar en la figura 7 como los corredores nº 2 y 3 vacían su contenido en el Salar de Llamara, Pampa del Tamarugal.

c) Análisis de relieve de los corredores

Este análisis está diseñado para ser ejecutado con imágenes NOAA, pero al momento de esta presentación todavía no se han seleccionado las fechas de observación que se adquirirán. Sin embargo la metodología propuesta se muestra en la figura 8 utilizando para este caso una imagen GOES. En esta figura se aprecia el resultado de la sobreposición de la cobertura de nubes bajas sobre el MED, al momento en que éstas ya se encuentran penetrando a través de los corredores del farellón costero. A partir de este resultado se realiza un análisis de altitudes, exposiciones y pendientes de cada corredor.

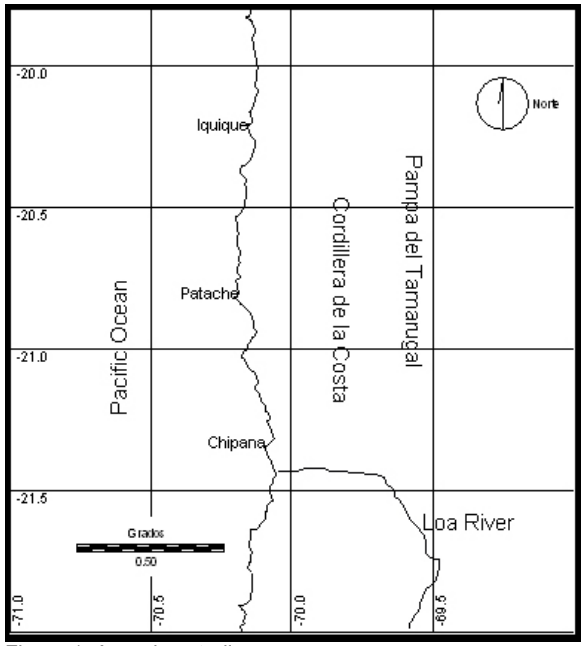

Figura 1: Area de estudio.

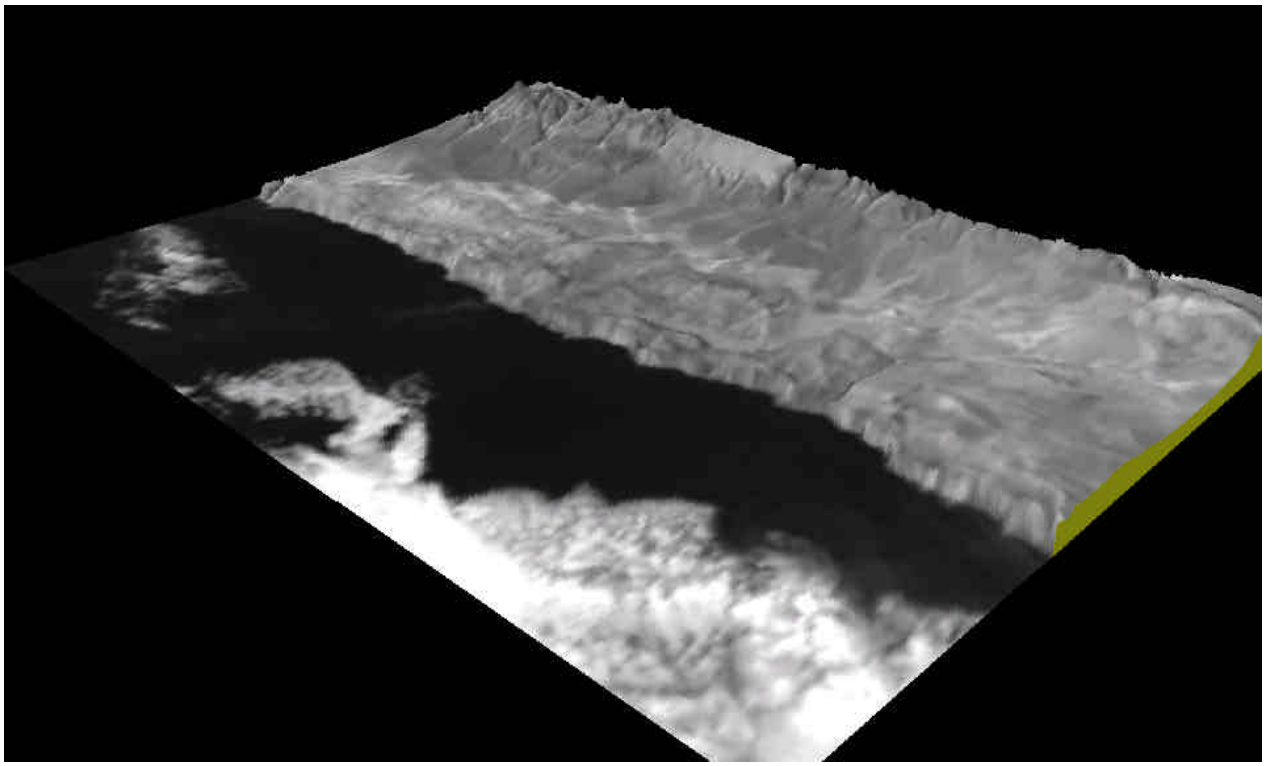
Figura 2: Combinación modelo tridimensional de terreno con imagen NOAA.

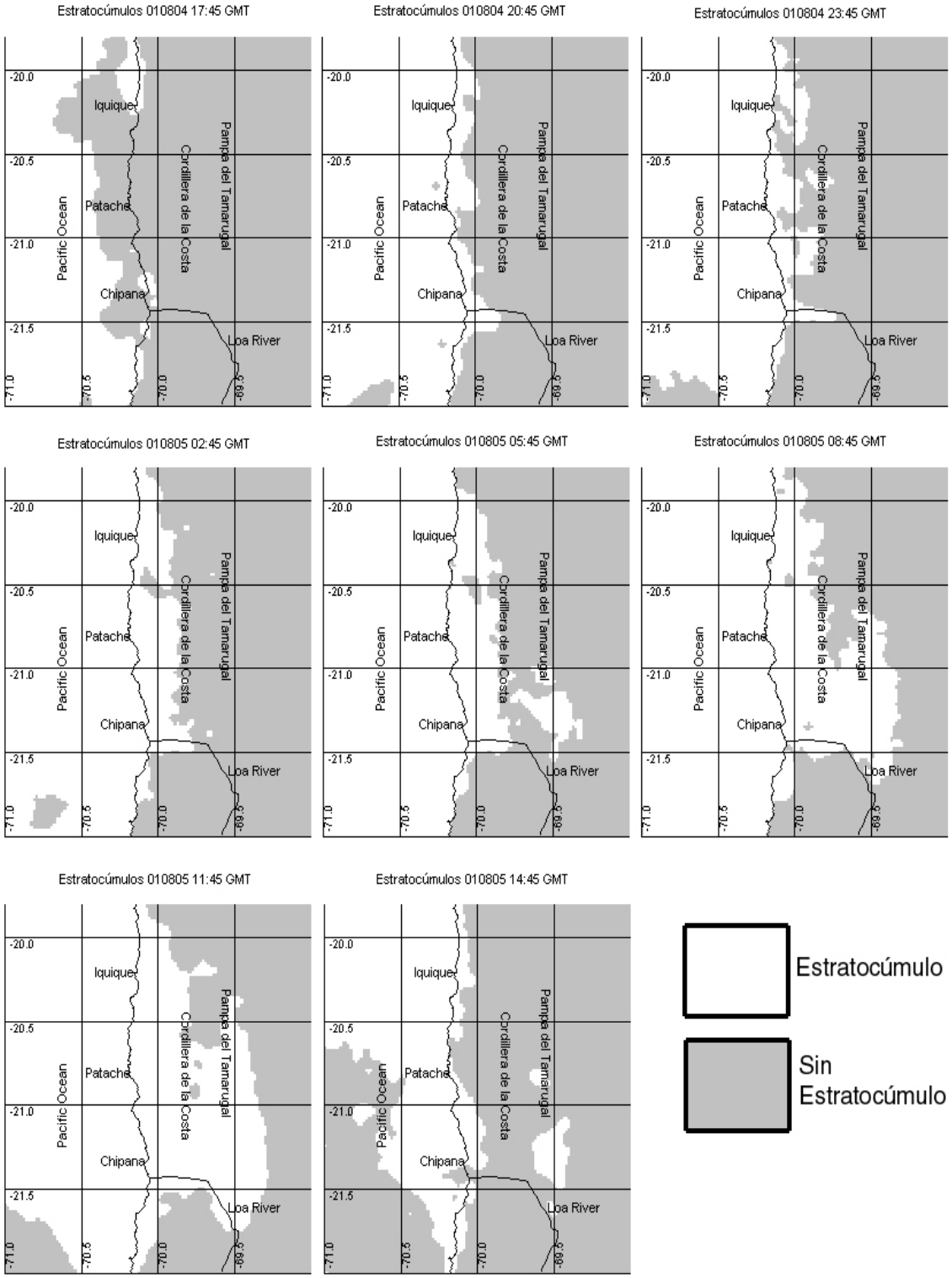

Figura 3: Evento GOES 4-5/08/2001.

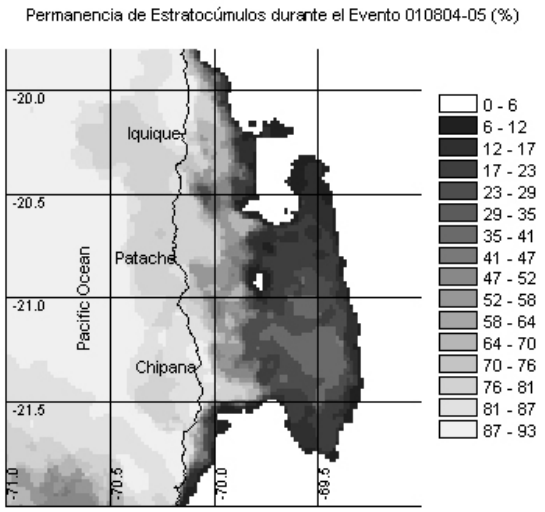

Figura 4: Frecuencia evento GOES 4-5/08/2001.

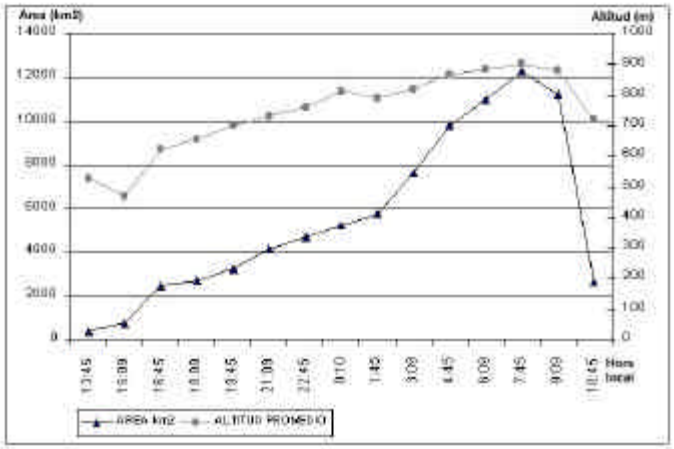

Figura 5: Area cubierta y altitudes promedio.

Tabla 1: Corredores de penetración en el farellón costero.

Nº	Sector	Latitud Sur	Longitud Oeste
1	Cerro Caleta Buena	19º 52' 38''	70º 07' 42''
2	La Liebre	20º 00' 00''	70º 07' 12''
3	Pampa del Molle	20º 15' 44''	70º 07' 19''
4	Patillos	20º 41' 30''	70º 09' 07''
5	Punta Chamache	21º 07' 37''	70º 07' 52''
6	Desembocadura río Loa	21º 25' 35''	70º 03' 24''
7	Quebrada Iquine	21º 42' 36''	70º 08' 34''

Coordenadas: Datúm PSAD 56

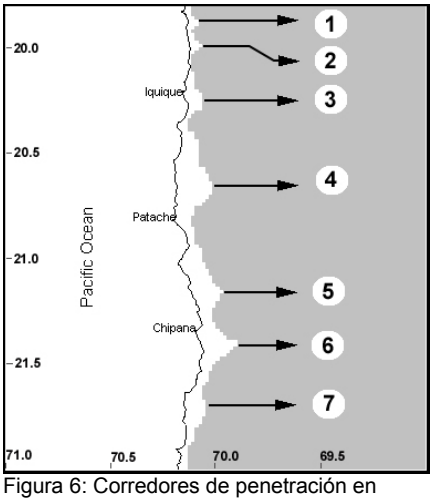

Figura 6: Corredores de penetración en

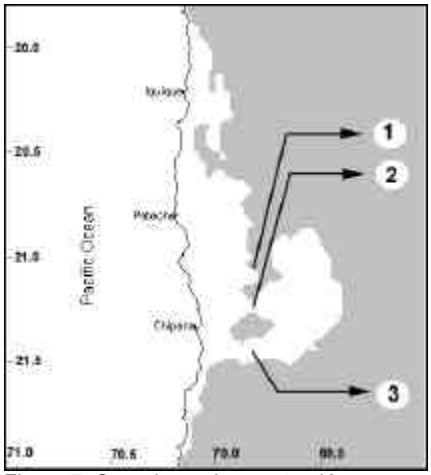

Figura 7: Corredores de penetración interiores.

Tabla 2: Corredores de penetración interiores.

Nº	Sector	Latitud Sur	Longitud Oeste
1	Cerro Morrillo Colorado	21º 04' 37''	69º 53' 46''
2	Montón de Gloria	21º 13' 38''	69º 53' 46''
3	Quebrada Amarga	21º 25' 16''	69º 45' 47''

Coordenadas: Datúm PSAD 56

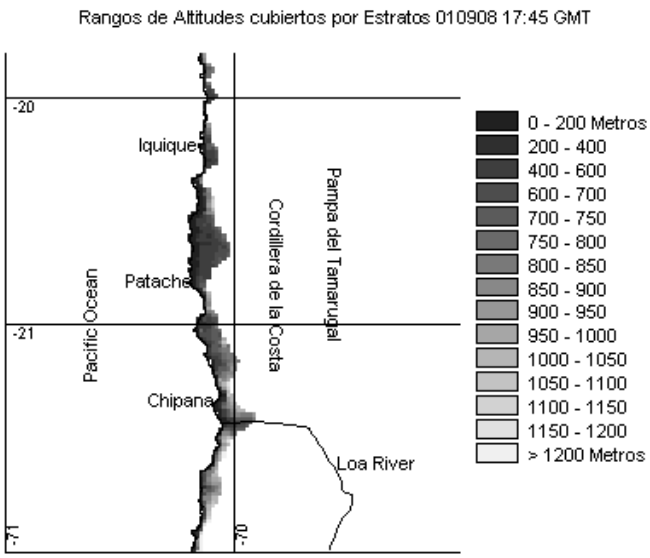

Figura 8: Rangos de altitudes cubiertos por estratocúmulos.

Referencias bibliográficas

BENDIX, J.; BACHMAN, M. (1993). "Climatology of fog layers in the Alpine Region – A study based on AVHRR data". 6TH AVHRR Data User's Meeting. Belgirate, Italy. 6; 237-243.

BENDIX, J. (1995). "A case study on the determination of fog optical depth and liquid water path using AVHRR data and relations to WLC and horizontal visibility" Intl. Journal of Remote Sensing, 16; 515-530.

CERECEDA, P.; LARRAIN, H.; LAZARO, P.; OSSES, P.; SCHEMENAHUER, R.S.; FUENTES, L. (1999). "Campos de tillandsias y niebla en el desierto de Atacama". Rev. de Geografía Norte Grande, 26, 3-13.

CERECEDA, P.; LARRAIN, H.; LAZARO, P.; OSSES, P.; SCHEMENAHUER, R.S.; PINTO, R. (2001). "Radiation, advective and orographic fog in the Tarapacá Region". Proceedings 2nd International Conference on Fog and Fog Collection, St. John's, Canada. 457-459.

IGM (1985). "Geografía, I Región de Tarapacá", en: IGM: Geografía de Chile, tomo 13, Instituto Geográfico Militar.

LARRAÍN, H.; CERECEDA, P.; SCHEMENAUER, R.S.; OSSES, P.; LÁZARO, P.; UGARTE, A.; MOLINA, J.I. (1999). "Evolución anual de la entomofauna de Coleópteros (Fam. Tenebrionidae y Carabidae), en el sitio Alto Patache, sur de Iquique, Chile". XXI Congreso de entomología chilena, Universidad de Tarapacá, Arica.

PINTO, R. (1999). "Oasis de Niebla. Una expedición botánica a los cerros costeros de Iquique durante "El Niño" 1997". Obra auspiciada por Compañía Minera doña Inés de Collahuasi.

RAMÍREZ, J. (1993). "Propuesta metodológica para la Detección de Nieblas mediante la utilización de imágenes GOES". Memoria de grado para optar al título de Geógrafo. Pontificia Universidad Católica de Chile.