

Estimación del nivel freático a partir del NDVI Landsat en La Pampa del Tamarugal (Chile)

M. Ortiz^{1,3}, L. Morales², P. Silva¹ y E. Acevedo¹

¹ Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Casilla 1004. Santiago. Chile

² Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Casilla 1004. Santiago. Chile

³ Centro de Estudios Avanzados en Fruticultura (CEAF). Conicyt-Regional R0811011

Resumen

El salar de Pintados se ubica en la Pampa del Tamarugal (Región de Tarapacá, Chile). Allí existen 21.696 ha de *Prosopis tamarugo* Phil., de las que el 14 a 20% se encuentra en mal estado. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios en el tiempo del estado de la población de *P. tamarugo* del salar de Pintados y asociarlos a la profundidad del nivel freático. A partir de mediciones mensuales de profundidad del nivel freático tomadas en 21 pozos de observación entre los años 1987 y 2003, se obtuvo un valor medio anual para cada pozo. Para cada año se estimó la distribución espacial de la profundidad del nivel freático mediante interpolación geoestadística a una malla común de 100 x 100 m. Se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de tres imágenes del satélite Landsat TM adquiridas en tres fechas de los años 1987, 1999 y 2003. Posteriormente se realizó un muestreo sistemático no alineado para extraer puntos en la imagen de satélite y datos interpolados de profundidad de nivel freático. Con esa información se realizó un análisis de regresión lineal, en el que se observó que los años 1999 y 2003 presentaban una relación similar entre NDVI y profundidad del nivel freático, mientras que el año 1987 mostró un comportamiento diferente. Para el año 1987 el coeficiente de determinación fue de 0,83 ($P \leq 0,05$) y en los años 1999 y 2003 fue de 0,86 ($P \leq 0,002$). A partir de la ecuación de regresión lineal para los valores de NDVI y profundidad de nivel freático de los años 1999 y 2003 se estimó que los tamarugos del salar de Pintados disminuyeron su actividad ($NDVI = 0,1$) cuando la profundidad del nivel freático fue de 10,0 m.

Palabras clave: *Prosopis tamarugo* Phil., NDVI, freatófita, defoliación, nivel freático.

Abstract

Estimation of water table depth from Landsat NDVI in the Pampa del Tamarugal (Chile)

The salar de Pintados is located in the Pampa del Tamarugal (Tarapacá Region, Chile), where there are 21,696 ha of *Prosopis tamarugo* Phil., of which 14 to 20% is in poor condition. The aim of this study was to evaluate changes over time in the status of the population of *P. tamarugo* of the Salar de Pintados and associate it with the depth of the water table. From monthly measurements of water table depth taken in 21 observation wells between 1987 and 2003, we obtained an average annual value for each well. For each year was estimated spatial distribution of water table depth using geostatistics interpolation to a common grid of 100 x 100 m. We calculated the normalized difference vegetation index (NDVI) from three Landsat TM images acquired on three dates for the years 1987, 1999 and 2003. Later a systematic non-aligned sampling was made to extract points in the satellite image and interpolated data of water table depth. With that information we performed a linear regression analysis, which showed that 1999 and 2003 had a similar relationship between NDVI and water table depth, while the year 1987 showed a different behavior. For 1987, the coefficient of determination was 0.83

* Autor para la correspondencia: mortiz@ceaf.cl
Recibido: 30-03-12; Aceptado: 15-05-12.

($P \leq 0.05$) and in the years 1999 and 2003 was 0.86 ($P \leq 0.002$). From the linear regression equation for NDVI values and water table depth in the years 1999 and 2003, it was estimated that in the Salar de Pintados *P. tamarugo* decreased their activity (NDVI = 0.1) when water table depth was 10.0 m.

Key words: *Prosopis tamarugo* Phil., NDVI, phreatophyte, defoliation, water table.

Introducción

El tamarugo (*Prosopis tamarugo* Phil.) es una especie freatófita endémica que crece en la Pampa del tamarugal, norte de Chile, Región de Tarapacá. Actualmente existen 40.771 ha de tamarugos de las que 10.852 ha corresponden a formaciones naturales de tamarugo y 29.919 ha corresponden a plantaciones de Tamarugo (PRAMAR, 2007), en su mayoría realizadas en un plan de forestación chileno entre los años 1965 y 1985. La mayor superficie de tamarugos se encuentra en el salar de Pintados con 21.696 ha de los cuales 6.542 ha corresponde a formaciones naturales y 15.154 ha fueron plantadas (PRAMAR, 2007). La Pampa del Tamarugal es una reserva subterránea de agua importante en una zona donde este recurso es particularmente escaso. Este acuífero se abastece del flujo de varias subcuencas que se emplazan en su borde oriental y que transportan el agua superficial y subterráneamente desde las partes altas de la cordillera de los Andes (sobre 3.000 msnm). La recarga estimada es de 880 l s^{-1} (DICTUC, 2006). En la Pampa no ocurren precipitaciones. Las descargas naturales corresponden a la evaporación que se produce en los salares donde la napa se encuentra a menos de 10 m de profundidad, la transpiración del bosque de tamarugos y la descarga subterránea hacia otros acuíferos. Actualmente, la extracción de agua subterránea es la principal descarga del sistema. Esta comenzó el año 1922 con un caudal un poco superior a 30 l s^{-1} (Karzulović y García, 1978). El año 1975 el caudal extraído era de 260 l s^{-1} (CORFO, 1975), en 1978 la extracción era de 322 l s^{-1} (Karzulović y García, 1978) y en 1995 era de 696 l s^{-1} (JICA, 1995). En la actualidad la extracción total es de 1.849 l s^{-1} (DGA, 2006). El desbalance entre la recarga del sistema y las descargas (naturales y antrópicas) ha provocado el descenso del nivel freático alrededor de las zonas de extracción. Peralta (1983) estimó que la extracción de agua en un sector del sa-

lar de Pintados generaba un cono de depresión de 1 a 2 km de radio, dentro del sector forestado se encontraban valores de descenso del nivel freático de 3 y 5 m. Un estudio realizado por JICA (1995) señaló que entre los años 1982 y 1993 el nivel freático aumentó en profundidad a una tasa baja, de 14 a 29 cm año^{-1} aproximadamente, sin cambios estacionales. En el salar de Pintados un 14% de los tamarugos naturales está en regular estado y un 14% está en mal estado, en los árboles plantados un 18% se encuentra en regular estado y un 20% se encuentra en mal estado (PRAMAR, 2007), lo que podría deberse al descenso del nivel freático más allá del alcance de las raíces. Una forma de evaluar la respuesta de freatófitas que son sometidas a descenso del nivel freático es el vigor de las plantas (Groeneveld, 1992), ya que la clorosis foliar (degradación de pigmentos de clorofila), pérdida de follaje y degradación de la estructura de la copa son síntomas típicos del deterioro de los bosques (Deshayes *et al.*, 2006). La magnitud de la senescencia es aparentemente cuantitativa y refleja la severidad del estrés hídrico, lo que entrega síntomas visibles antes del daño letal (Rood *et al.*, 2003). Un método para evaluar el estado de las plantas es a través de la reflectividad o proporción de energía lumínica que reflejan direccionalmente en relación a la energía incidente. Esta reflectividad depende de las propiedades de la superficie de hojas, su estructura interna y la concentración y distribución de componentes bioquímicos, por lo que el análisis remoto de la luz reflejada puede ser usada para evaluar la biomasa y el estado fisiológico de las plantas (Peñuelas y Filella, 1998). La vegetación sana posee un espectro que se caracteriza por un claro contraste entre distintas regiones del espectro electromagnético, ya que la mayor parte de la radiación solar recibida por la planta en el espectro visible (VIS) es absorbida por los pigmentos de las hojas, mientras que éstos apenas afectan a la radiación recibida en el infrarrojo cercano (NIR). Específicamente, la vegetación

sana presenta una baja reflectividad en el visible y una alta reflectividad en el infrarrojo cercano, mientras que en áreas defoliadas la reflectancia en el rango NIR disminuye, mientras que en el rango VIS aumenta (Deshayes *et al.*, 2006). El uso de algunas bandas que se obtienen de imágenes satelitales en el cálculo de cocientes o índices permite identificar y diferenciar la condición de las masas vegetales (Chuvieco, 2002). Uno de ellos es el índice de vegetación de diferencia normalizado, NDVI, por su sigla en inglés. El estado de la vegetación, estimado a través del NDVI, estaría asociado a la profundidad del nivel freático. Este estudio tiene por objetivo evaluar los cambios en el tiempo del estado de la población de tamarugos del salar de Pintados y asociarlos a la profundidad del nivel freático.

Material y métodos

Lugar de estudio

El estudio se realizó en el salar de Pintados, el que se ubica en la Región de Tarapacá, Provincia de Tarapacá, Chile. En el salar se ubica una población de tamarugos (*Prosopis tamarugo* Phil.) de 21.696 ha. De estos 6.542 ha corresponden a formaciones naturales y 15.154 ha a tamarugos plantados (Pramar, 2007). Esta zona posee en clima desértico normal o BWt, el cual se caracteriza fundamentalmente por una masa de aire muy estable y seca que origina una gran aridez, cielos despejados todo el año y una humedad atmosférica baja. La oscilación térmica diaria es alta, pudiendo llegar a 25°C, debido al gran enfriamiento nocturno, que en algunos sectores produce temperaturas mínimas cercanas a 0°C (Dirección_Meteorológica_de_Chile, 2010).

Profundidad del nivel freático

Se obtuvo información de la profundidad del nivel freático de 21 pozos de medición distribuidos en el salar de Pintados (Tabla 1) entre los años 1987 y 2005. En cada pozo existían entre 3 a 12 registros por año, por lo que se obtuvo un promedio para cada año en cada pozo.

Tabla 1. Pozos de medición de la profundidad del nivel freático y su coordenada en UTM-195

ID	Pozo	Coordenada UTM	
		Norte	Este
11	S.Pintados D-66	7754287.38	422275.14
12	Pozo P. Sara 3 D-72	7753269.09	421826.44
13	Sara-Tirana D-81	7752238.86	427022.33
14	La Tirana J-E	7752047.18	428308.37
15	Gmo.Araya A-100	7747781.00	431716.00
18	Mendieta A-9	7743962.03	435202.68
19	Esmeralda 6 C-174	7742996.39	449838.06
20	Essat-Canchones D 134	7740067.00	446035.00
21	Sn.Genaro A-133	7739720.11	444512.42
22	Canchones J-6	7739607.83	445819.08
23	Hispania 138	7739545.49	433019.22
25	L.Quispe D-167	7735969.47	440798.37
32	S. Pintados 162	7734182.78	420332.76
36	B. Junoy J-7	7732109.98	430724.29
37	B.Junoy 230	7731952.59	433998.58
38	S.Pintados 235	7728801.77	422998.53
40	S.Pintados 237	7726665.46	432893.19
41	Pica C/Antiguo J-8	7723064.67	446077.55
43	S.Pintados 254	7720947.09	432507.63
44	S.Pintados 256	7720697.37	435469.68
45	E.Exp.Pintados 263	7718878.00	440426.00

Para cada año se estimó la distribución espacial de la profundidad de los pozos mediante interpolación geoestadística a una malla común de 100 × 100 m usando un modelo de variograma global, exponencial y kriging en bloques con del programa VESPER, versión 1.6.2 (Minasny *et al.*, 2002). De esta forma los datos faltantes en los pozos utilizados fueron interpolados espacial y temporalmente para completar las series y conocer las tendencias.

Imágenes satelitales

Se utilizaron tres imágenes del satélite Landsat Thematic Mapper adquiridas los días 30 de julio de 1987, 15 de noviembre de 1999 y 26 de enero de 2003, las que fueron descargadas desde el servidor del Earth Science Data Interface (ESDI) el día 29 de abril de 2009. Para el tratamiento de la información raster y vectorial se utilizó el programa Idrisi Kilimanjaro (Eastman, 2004). Las imágenes fueron corregidas geométricamente utilizando un archivo vectorial de la red hídrica y de caminos, obtenidos por digitalización de los mapas a escala

1:50.000 del Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM) usando ecuaciones polinomiales de segundo orden. El método de remuestreo fue de convolución cúbica, con una resolución espacial de 30 × 30 m, y se georeferenció según el Datum WGS84 y Huso 19 sur. Para la corrección atmosférica se utilizó el método propuesto por Chávez (1996) con la finalidad de reducir el efecto de los aerosoles en la imagen. No se realizaron correcciones de normalización topográfica pues el área de estudio es plana (Riaño *et al.*, 2003).

Con el fin de estimar el estado hídrico de la planta, en toda la zona de estudio, se utilizó el índice de vegetación normalizado NDVI (Rouse *et al.*, 1974; Tucker, 1979) que permite apreciar la intensidad de la actividad clorofílica y que tiene la ventaja de ser un índice sencillo. En el caso de una imagen LANDSAT se calcula de acuerdo a:

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad [1]$$

donde ρ_4 y ρ_3 son las reflectividades calculadas a partir de los canales infrarrojo cercano (4) y rojo (3).

Posteriormente se realizó un muestreo sistemático no alineado para extraer puntos en la imagen de satélite y los datos interpolados de profundidad de nivel freático. El número de puntos de muestreo (n) se estimó de acuerdo a:

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{L^2 + \frac{z^2 \sigma^2}{N}} \quad [2]$$

donde z (95%) es la abscisa de la curva normal para un valor determinado de probabilidad, σ^2 es la varianza muestral, N el tamaño de la población, y L es el margen de error permitido, que fue de un 5%. Finalmente se realizaron regresiones lineales entre el NDVI y el nivel freático para los puntos muestreados.

Resultados

Nivel freático

El análisis geostatístico de la profundidad del nivel freático en el salar de Pintados permitió obtener un registro para cada pozo entre

los años 1987 y 2005. A partir de la serie de tiempo media anual generada se calculó, mediante una regresión lineal, la tasa de cambio de la profundidad del nivel freático para el periodo analizado (pendiente) y el descenso promedio respecto al valor registrado en 1987 (Tabla 2). Este análisis mostró que los valores de pendiente fluctuaron entre $-0,44$ y $0,25$ m año⁻¹ (los valores negativos señalan descenso del nivel freático y los valores positivos indican ascenso). A los valores de profundidad de cada pozo se le realizó el test de Mann-Kendall (Kendall, 1938), de manera de evaluar si la tendencia a descender del nivel freático era significativa. Esta fue significativa en todos los pozos, excepto en los pozos, 14, 15, 18, 20, 22, 36 y 41 (Tabla 2). El mayor valor de descenso promedio se observó en el pozo 20, que tuvo un valor de $-10,9$ m, con un máximo de $-19,7$ m el año 1998 y una pendiente de $-0,44$ m año⁻¹ (Tabla 2). El pozo 22 tuvo un descenso pro-

Tabla 2. Descenso del nivel freático promedio entre 1987 y 2005, pendiente de los valores de profundidad del nivel freático entre 1987 y 2005, descenso máximo y ascenso máximo calculados respecto al valor registrado en 1987 en cada pozo de medición y significancia (p) de la tendencia al descenso del nivel freático calculada mediante el test de Mann-Kendall

Pozo	Descenso promedio (m)	Pendiente (m año ⁻¹)	Descenso máximo (m)	Ascenso máximo (m)	p
11	-1.32	-0.13	-3.10	-0.03	0.0000
12	-0.89	-0.11	-1.76	1.02	0.0000
13	-3.16	-0.04	-6.47	0.05	0.0026
14	-0.69	0.20	-4.82	1.27	0.9462
15	1.52	0.05	-0.38	3.09	0.3121
18	3.32	-0.09	0.81	5.56	0.3121
19	-1.98	-0.23	-3.63	0.86	0.0000
20	-10.85	-0.44	-19.65	-0.36	0.1636
21	-5.92	-0.27	-14.90	-0.27	0.0401
22	-7.69	0.25	-20.03	0.25	0.7793
23	1.20	-0.01	-0.52	2.33	0.0087
25	-1.84	-0.16	-2.91	-0.16	0.0000
32	-1.08	-0.09	-1.67	-0.09	0.0000
36	0.01	0.01	-0.49	0.27	0.5279
37	-2.04	-0.07	-2.43	-0.07	0.0059
38	-0.56	-0.04	-0.95	-0.04	0.0002
40	-0.11	-0.07	-0.66	0.60	0.0000
41	1.82	0.08	-0.50	3.56	0.7793
43	-0.93	-0.08	-1.55	-0.08	0.0000
44	-1.13	-0.10	-1.94	-0.10	0.0000
45	0.77	-0.06	-3.49	2.54	0.0150

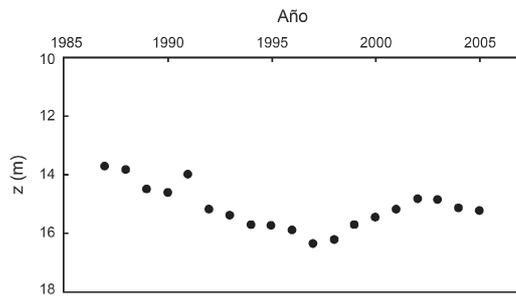


Figura 1. Media de profundidad del nivel freático para los 21 pozos de medición entre 1987 y 2005.

medio de $-7,7$ m, con un máximo de $-20,0$ m el año 1997, pero después recuperó su nivel, por lo que la pendiente fue positiva ($0,25$ m año^{-1} , Tabla 2). Esta situación también explica los valores de pendiente positivos observados en los pozos 14, 15, 18, 36 y 41. La profundidad del nivel freático media para los 21 pozos de medición en 1987 fue de $13,7$ m, aumentó hasta llegar a $16,4$ m en el año 1997 y después se recuperó, llegando a $15,2$ m el año 2005 (Fig. 1).

Índice de vegetación NDVI

La Figura 2 muestra las imágenes de NDVI calculadas para el salar de Pintados a partir de información LANDSAT-TM adquiridas los días 30 de julio de 1987, 15 de noviembre de 1999 y 26 de enero de 2003 respectivamente. En ellas se observa claramente en cada año los límites del Salar de Pintados correspondientes

a la población de tamarugos en relación al desierto de Atacama que lo rodea.

Se observó que en 1987 los valores de NDVI positivos estuvieron asociados a un nivel freático entre $10,0$ y $20,9$ m de profundidad, hecho considerado anómalo probablemente debido a que ese año se evidenciaba en Chile el fenómeno de El Niño intensamente. Para el caso de Chile un evento de esta naturaleza trae consigo un aumento de las precipitaciones, y por ende una mayor probabilidad de que las napas freáticas se recarguen. En 1999 los valores de NDVI fueron positivos a $10,7$ m y fueron negativos entre $10,8$ y $12,5$ m de profundidad. El año 2003 los valores de NDVI fueron positivos entre $9,9$ y $10,5$ m, mientras que entre $11,1$ y $12,5$ m de profundidad de nivel freático los valores de NDVI fueron negativos.

Para encontrar una relación cuantitativa simple, de forma de utilizar el NDVI como indicador del nivel freático, se realizó un muestreo sistemático no alineado sobre toda el área de estudio y en 46 puntos de acuerdo a la ecuación 2 (Tabla 3). Los puntos muestreados fueron ordenados de acuerdo al valor de NDVI y se agruparon de acuerdo a los intervalos de NDVI (Tabla 4), posteriormente se obtuvo el promedio de NDVI (\overline{NDVI}) y el promedio de profundidad del nivel freático para cada intervalo. Este procedimiento se realizó con los datos de 1987, 1999 y 2003 (Tabla 4). La Figura 3 muestra la relación existente entre \overline{NDVI} y nivel freático para cada intervalo considerado en los años 1987, 1999 y 2003, la cual en primera aproximación es lineal. Este comportamiento puede ser explicado porque el descenso del nivel freático supone menor disponibilidad de agua pa-

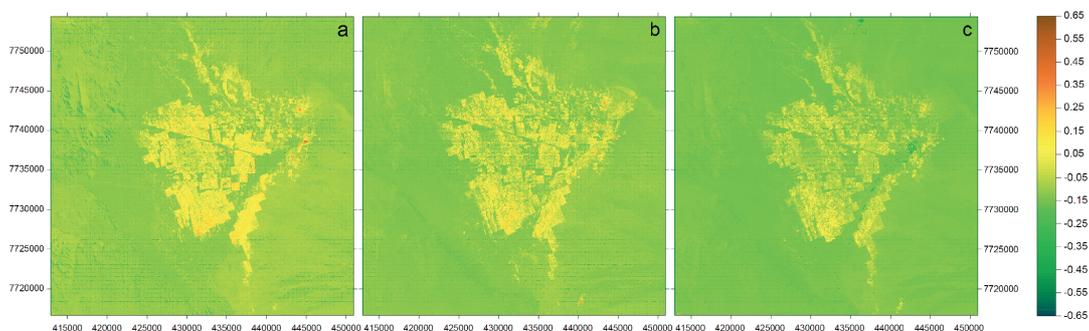


Figura 2. NDVI calculado para el salar de Pintados con las imágenes del satélite Landsat Thematic Mapper adquiridas los días 30 de julio de 1987 (a), 15 de noviembre de 1999 (b) y 26 de enero de 2003 (c).

Tabla 3. Valores de profundidad del nivel freático y NDVI obtenidos de los muestreos realizados en los planos de isoprofundidad de nivel freático y NDVI para los años 1987, 1999 y 2003

Punto	Profundidad del nivel freático (m)			NDVI		
	1978	1999	2003	1987	1999	2003
1	23.7	15.1	14.3	0.08	-0.13	0.01
2	24.2	14.7	13.7	0.02	-0.04	0.05
3	19.4	10.8	11.0	0.27	-0.14	0.12
4	19.6	10.2	10.4	0.20	-0.01	0.05
5	19.5	10.0	10.3	0.15	-0.03	-0.03
6	24.0	10.5	10.4	0.22	0.01	0.09
7	28.3	13.3	11.8	0.07	0.05	0.05
8	28.1	12.1	11.3	0.16	-0.13	-0.02
9	15.3	9.6	10.1	0.11	-0.12	0.03
10	12.6	8.3	8.7	0.13	-0.08	-0.01
11	20.4	9.4	9.8	0.08	-0.02	0.02
12	26.0	12.0	11.8	0.17	0.04	0.13
13	21.4	11.0	11.0	0.16	0.00	-0.01
14	13.3	7.9	8.0	0.19	-0.11	0.07
15	10.0	5.9	6.2	0.33	0.01	0.08
16	13.0	7.6	7.7	0.17	0.00	0.17
17	16.4	10.8	10.8	0.23	-0.02	0.03
18	21.5	13.7	13.1	0.05	0.01	0.03
19	27.2	15.2	14.0	0.16	-0.11	0.01
20	18.3	8.7	9.2	0.10	-0.05	0.12
21	15.1	8.3	8.7	0.08	-0.04	0.01
22	9.3	6.0	6.3	0.17	-0.08	0.02
23	26.0	11.2	11.1	0.09	-0.09	0.01
24	13.9	8.6	9.1	0.16	-0.04	0.04
25	11.1	7.2	7.5	0.27	-0.09	0.09
26	18.1	9.1	9.7	0.11	-0.08	0.01
27	39.5	27.0		0.29	-0.06	0.21
28	14.2	8.5	8.6	0.17	-0.08	0.10
29	30.2	14.7	13.4	0.13	-0.11	-0.05
30	32.7	13.9	12.1	0.07	-0.13	0.02
31	11.4	7.1	7.4	0.03	-0.13	-0.06
32	21.6	9.6	9.9	0.11	-0.13	-0.01
33	19.0	13.7	13.8	0.20	-0.08	-0.09
34	18.1	8.9	9.3	-0.03	-0.12	0.04
35	16.6	10.7	11.1	-0.10	-0.02	-0.13
36	19.2	13.6	13.3	-0.01	-0.11	-0.09
37	25.3	14.9	13.9	0.09	-0.10	-0.05
38	42.2	21.0	14.7	0.38	-0.12	0.08
39	18.2	10.2	10.2	0.11	-0.09	-0.01
40	11.9	8.6	9.1	0.11	-0.13	-0.01
41	26.0	11.2	10.8	0.20	-0.04	-0.03
42	25.9	11.8	11.1	0.02	0.02	-0.02
43	17.7	9.7	10.2	0.05	-0.04	-0.04
44	29.7	14.6	12.5	0.09	-0.13	0.01
45	33.1	16.4	13.1	0.14	-0.05	-0.04
46	32.8	17.9	13.9	-0.04	-0.14	-0.11

ra la planta, lo que provocaría la disminución de la cobertura foliar. Se realizó un análisis de

regresión lineal entre los valores promedios de NDVI y profundidad del nivel freático para los años 1987, 1999 y 2003. En este análisis se observó que los años 1999 y 2003 presentaron la misma relación, sin embargo el año 1987 fue significativamente diferente producto del evento de El Niño en ese año. Se observó que para el año 1987 el coeficiente de determinación fue de 0,83 ($P \leq 0,05$, ecuación [3]) y en los años 1999 y 2003 fue 0,86 ($P \leq 0,002$, ecuación [4]).

$$Z_{1987} = 21,873 - 27,484 \cdot \text{NDVI} \quad [3]$$

$$Z_{1999, 2003} = 10,972 - 9,9696 \cdot \text{NDVI} \quad [4]$$

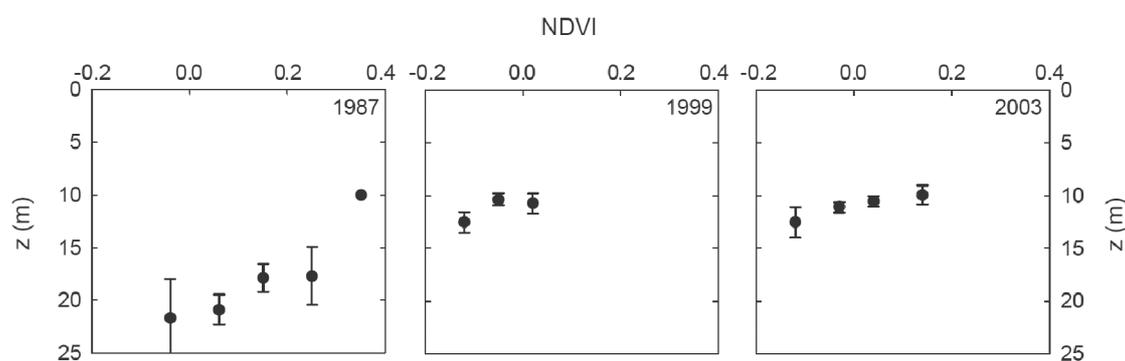
Discusión

En la imagen satelital de 1987 el 10% de los puntos tuvieron valores de NDVI menores a 0,0 y mostró una gran dispersión de valores, ya que se observó valores positivos entre 9,3 y 42,2 m de profundidad de nivel freático (Tabla 3), que se explicaría por el evento El Niño. El año 1999 el 60% de los puntos fueron menores a 0,0 y el año 2003 el 40%. El alto número de puntos con valor de NDVI negativo en 1999 podría explicarse porque el nivel freático tuvo su menor valor promedio los años 1997 y 1998 (Fig. 1), con descenso de 19,7, 14,9 y 20,0 m en los pozos 20, 21 y 22 respectivamente. Esto podría haber afectado el estado de los árboles cercanos a esos pozos. Sin embargo, entre 1999 y 2002 el nivel freático subió, recuperando su nivel en 12,7, 12,3 y 18,8 m en los pozos 20, 21 y 22, por lo que los árboles menos afectados podrían haber mejorado su condición.

En los años 1999 y 2003 se observó que los valores de NDVI fueron positivos a profundidades de nivel freático menores a 10,7 m. Un alto valor de NDVI es indicador de alta actividad de la vegetación (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), porque está relacionado con la capacidad fotosintética de la canopia y la resistencia estomática (Gamon *et al.*, 1993; Gamon *et al.*, 1995; Griffith *et al.*, 2010). Además, considerando que el NDVI es afectado por cambios en el color por la pérdida de pigmentos en las plantas que se deshidratan, éste está indirectamente relacionado con la concentración de agua de plantas vivas (Peñuelas *et al.*, 1997). Existen antecedentes en tamarugos en que se ha aso-

Tabla 4. Valores promedio de profundidad del nivel freático (Prof) y NDVI (\overline{NDVI}) obtenidos para cada intervalo de NDVI en los años 1987, 1999 y 2003, y la fracción muestral en cada clase (%)

Intervalo NDVI	1987			1999			2003		
	\overline{NDVI}	Prof. (m)	%	\overline{NDVI}	Prof. (%)	%	\overline{NDVI}	Prof. (m)	%
-0.2 a -0.11	—	—	—	-0.12	12.5	0.36	-0.12	12.5	0.04
-0.10 a 0.0	-0.04	21.7	0.10	-0.05	10.8	0.46	-0.03	11.1	0.36
0.01 a 0.1	0.06	20.9	0.29	0.02	10.7	0.18	0.04	10.5	0.51
0.11 a 0.20	0.15	17.9	0.47	—	—	—	0.14	9.9	0.09
0.21 a 0.30	0.25	17.7	0.11	—	—	—	—	—	—
0.31 a 0.40	0.35	10.0	0.03	—	—	—	—	—	—

**Figura 3.** Valores de profundidad del nivel freático y promedio de NDVI en cada rango para los años 1987, 1999 y 2003.

ciado la profundidad del nivel freático al estado de los árboles. Karzulović y García (1978) observaron árboles jóvenes del área Canchones-La Tirana marchitos y secos, lo que asociaron al descenso del agua subterránea a una profundidad mayor que el alcance de sus raíces. Aguirre y Wrann (1985) midieron el crecimiento de árboles de 8 a 15 años de edad en términos de altura media, y vieron que ésta era significativamente mayor en sitios donde la profundidad del nivel freático era de 0 a 4 m, sin embargo, en árboles mayores a 15 años las diferencias de crecimiento en relación a profundidad son menores. Ortiz *et al.* (2011) observaron en tamarugos del salar de Llamara una disminución del porcentaje de copa verde, ocasionado probablemente por el descenso del nivel freático. Una respuesta similar se ha observado en *Populus deltoides* (Scott *et al.*, 1999; Cooper *et al.*, 2003), *Populus fremontii*, *Salix gooddingii* y *Tamarix chinensis* (Horton *et al.*, 2001) frente al descenso del nivel freático. *Pinus halepensis*, en el Sureste de España, frente a condiciones de estrés hídrico severo adopta

la estrategia de disminuir la biomasa foliar (Belmonte *et al.*, 2008). Considerando esto, la asociación negativa entre profundidad del nivel freático y NDVI observada en la Figura 3 señala que este factor estaría afectando la actividad de los tamarugos. En este sentido, Weiss *et al.* (2004) y Griffith *et al.* (2010) señalan que el seguimiento del NDVI a largo plazo puede elucidar las relaciones entre fluctuaciones interanuales de la vegetación y el clima, que fue el factor que determinaba la disponibilidad de agua. En la pampa del tamarugal no ocurren precipitaciones por lo que la única fuente de agua para los tamarugos es el agua subterránea y considerando la asociación observada entre NDVI y profundidad del nivel freático (ecuación [4]), es posible estimar la profundidad de la napa a través del cálculo de NDVI.

La profundidad a la que las raíces de las plantas pierden contacto con el agua subterránea se denomina «profundidad de extinción» (Groeneveld, 2008). En una formación de *Sporobolus airoides* (Torrey) Torrey, *Chrysothamnus nauseosus* ssp. *consimilis* (E. Gree-

ne) y *Sarcobatus vermiculatus* (Hook.) Torrey Groeneveld (2008) encontraron que la profundidad de extinción era de 7,1 m. Jin *et al.* (2007) estimaron mediante el análisis del NDVI y la profundidad del nivel freático en la Planicie de Yinchuan, que el nivel freático tenía baja influencia en el crecimiento de la vegetación cuando se encontraba a una profundidad mayor a 6,2 m. De acuerdo a la forma de calcular el NDVI, este puede variar entre -1,0 y 1,0, pero el rango de NDVI en que varía la vegetación está entre 0,1 y 0,6 (Kidwell, 1990). Si se consideran las regresiones obtenidas del análisis de los puntos de NDVI y profundidad del nivel freático en los años 1999 y 2003 (ecuación [4]), cuando el NDVI es 0,1 la profundidad del nivel freático es de 10,0 m, lo que significaría que hasta esa profundidad se podría observar tamarugos activos.

Conclusiones

La relación entre los valores de NDVI y profundidad de nivel indican que los tamarugos del salar de Pintados disminuyen su actividad a medida que el nivel freático se hace más profundo. La profundidad a la cual la actividad de la vegetación llega a su mínimo (NDVI = 0,1) es de 10,0 m.

Referencias

- AGUIRRE, J., & WRANN, J. 1985. Especies del género *Prosopis* y su manejo en la Pampa del Tamarugal. In: Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*. Habit, M. (eds). Arica, Chile. 11-15 de Junio de 1984, FAO: 500.
- BELMONTE, F., LÓPEZ, F., & ROMERO, A. 2008. Reducción de la biomasa del Pino Carrasco (*Pinus halepensis*) en un área del sureste semiárido peninsular como estrategia para evitar estrés hídrico. *Papeles de Geografía* 47-48: 25-34.
- COOPER, D. J., D'AMICO, D. R., & SCOTT, M. L. 2003. Physiological and morphological response patterns of *Populus deltoides* to alluvial groundwater pumping. *Environmental Management* 31: 215-226.
- CORFO, 1975. Catastro Pampa del Tamarugal. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile.
- CHÁVEZ, P. 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62: 1025-1036.
- CHUVIECO, E. 2002. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio Barcelona, Ariel.
- DESHAYES, M., GUYON, D., JEANJEAN, H., STACH, N., JOLLY, A., & HAGOLLE, O. 2006. The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. *Annals of Forest Science* 63: 579-595.
- DGA, 2006. Catastro de obras en cauces naturales y áreas de restricción. Volumen I. Len & Asociados Ingenieros Consultores, Pontificia Universidad Católica de Chile DICTUC. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago, 92.
- DICTUC, 2006. Estudio hidrológico para actualización de la estimación de la recarga de los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, Sur Viejo y Llamara. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. SOQUIMICH. Santiago, Chile.
- DIRECCIÓN_METEREOLÓGICA_DE_CHILE. 2010. Climatología de Chile. Santiago, Chile, Dirección Meteorológica de Chile. Dirección Nacional de Aeronáutica Civil.
- EASTMAN, R. 2004. IDRISI Kilimanjaro. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Manual Versión 14.00. Clark Labs, mayo de 2004. Clark University.
- GAMON, J. A., FIELD, C. B., GOULDEN, M. L., GRIFFIN, K. L., HARTLEY, A. E., JOEL, G., PEÑUELAS, J., & VALENTINI, R. 1995. Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. *Ecological Applications* 5: 28-41.
- GAMON, J. A., FIELD, C. B., ROBERTS, D. A., USTIN, S. L., & VALENTINI, R. 1993. Functional patterns in an annual grassland during an AVIRIS overflight. *Remote Sensing of Environment* 44: 239-253.
- GRIFFITH, A. B., ALPERT, H., & LOIK, M. E. 2010. Predicting shrub ecophysiology in the Great Basin Desert using spectral indices. *Journal of Arid Environments* 74: 315-326.
- GROENEVELD, D. P. 1992. Owens Valley, California, Plant Ecology: Effects from Export Groundwater Pumping and Measures to Conserve the Local Environment. White Mountain Research Station Symposium IV Proceedings: «The History of Water: Eastern Sierra, Owens Valley, White-Inyo Range», Los Angeles, California, University of California Regents.
- GROENEVELD, D.P. 2008. Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table. *Journal of Hydrology* 358: 294-303.
- HORTON, J. L., KOLB, T. E., & HART, S. C. 2001. Physiological response to groundwater depth va-

- ries among species and with river flow regulation. *Ecological Applications* 11: 1046-1059.
- JICA, 1995. The study on the development of water resources in northern Chile. Japan International Cooperation Agency (JICA), Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Pacific Consultants Internacional.
- JIN, X., WAN, L., ZHANG, Y., XUE, Z., & YIN, Y. 2007. A Study of the Relationship Between Vegetation Growth and Groundwater in the Yinchuan Plain. *Earth Science Frontiers*. 14: 197-203.
- KARZULOVIC, J., & GARCÍA, F. 1978. Evaluación de los recursos hídricos de la provincia de Iquique: antecedentes básicos. Dirección General de Aguas, SERPLAC Iquique, 50.
- KENDALL, M. G. 1938. A new measure of rank correlation. *Biometrika* 30: 81-93.
- KIDWELL, K. B. 1990. Global Vegetation Index User's Guide. USDOC/NOAA National Climatic Data Center, Satellite Data Services Division. Washington, 45.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A. B., & WHELAN, B. M. 2002. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006.
- ORTIZ, M. 2011. Nivel freático en la Pampa del Tamarugal y crecimiento de *Prosopis Tamarugo* Phil. Santiago, Chile, Universidad de Chile. Tesis de Doctorado. 93 p.
- PEÑUELAS, J., & FILELLA, I. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status *Trends in Plant Science* 3: 151-156.
- PEÑUELAS, J., PIÑOL, J., OGAYA, R., & FILELLA, I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* 18: 2869-2875.
- PERALTA, F. 1983. Recursos hídricos de la Pampa del Tamarugal.
- PRAMAR. 2007. Existencias y estado vital de Tamarugos y Algarrobos Blancos en la Pampa del Tamarugal y Salar de Llamara 58° Congreso de la Sociedad Agronómica de Chile, Arica, Chile, PRAMAR Ambiental Consultores.
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J., & AGUADO, I. 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 41: 1056-1061.
- ROOD, S. B., BRAATNE, J. H., & HUGHES, F. M. R. 2003. Ecophysiology of riparian cottonwoods: stream flow dependency, water relations and restoration. *Tree Physiology* 23: 1113-1124.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W., & HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report. Greenbelt, MD, 371.
- SCOTT, M. L., SHAFROTH, P. B., & AUBLE, G. T. 1999. Responses of Riparian Cottonwoods to Alluvial Water Table Declines. *Environmental Management* 23: 347-358.
- TUCKER, C. J. 1979. Red and infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 127-150.
- VICENTE-SERRANO, S. M., LASANTA, T., & GRACIA, C. 2010. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150: 614-628.
- WEISS, J. L., GUTZLER, D. S., COONROD, J. E., & DAHM, C. N. 2004. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments* 58: 249-272.