

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE LA MEGASEQUÍA 2010 - 2016 EN CHILE MEDIANTE EL ÍNDICE DE
PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO**

RODRIGO OJEDA PINTO¹
JOSE VARGAS BAECHER²

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el período 2010-2016, conocido como Megasequía (MS), la que afectó a la zona centro y sur de Chile, mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), el cual tiene extensas aplicaciones en todo el mundo.

La metodología aplicada se basa en el estudio del SPI y sus características, para su posterior aplicación en el área comprendida entre las Regiones de Valparaíso y Magallanes en Chile (32°S a 56°S). Se analizaron características de duración, intensidad y magnitud de sequía en el período especificado a través de tablas y mapas de interpolación espacial, además de una comparación con otro período extremo de sequía.

Los resultados indicaron que según el SPI, la megasequía afectó al 99,4% de las estaciones del estudio y se concentró principalmente en los años 2014 y 2016, obteniendo en esos años los mayores valores tanto de duración, intensidad y magnitud. Asimismo, durante todo el período 2010-2016, la Región del Biobío resultó ser la zona con los valores más altos de duración y magnitud. Finalmente, la magnitud de la megasequía fue un 33% mayor que la sequía ocurrida entre los años 1998-1999, debido principalmente a su larga duración.

¹Estudiante de Ingeniería Civil y MSc, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – roojeda@udec.cl

²Profesor Titular, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – jvargas@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

La sequía meteorológica, relacionada exclusivamente a la escasez de precipitaciones, es una de las principales causas naturales de daño agrícola, ambiental y socio-económico. Los efectos colaterales de las sequías se han estudiado a lo largo de la historia. Según Below et al. (2007), entre 1900 y 2004, a nivel mundial, las sequías causaron más del 50% del total de muertes por desastres naturales, y sólo es superada por las inundaciones en número de personas afectadas. Además, se genera un gran gasto público y privado, siendo las obras de ingeniería e infraestructura las más comunes, seguidas por los subsidios agrícolas, además del gasto en camiones aljibes por parte de municipalidades, que entre los años 2011 y 2014 se concentró principalmente en la Región del Biobío (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015). Estas acciones se ejecutan luego del dictamen de decretos de escasez hídrica, tanto a nivel regional como de cuencas, por parte de la Dirección General de Aguas (DGA).

Una forma de identificar, medir y cuantificar una sequía es mediante el uso de índices de sequía, los cuales pueden variar desde cálculos muy simples a cálculos numéricos complejos, razón por la cual existe en la literatura un gran número de estos para describir un evento seco. Uno de estos índices es el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), usado ampliamente en todo el mundo (al igual que en Chile). A partir de esto, la investigación se centró en el análisis de las sequías meteorológicas mediante el SPI, especialmente la ocurrida en Chile entre los años 2010 y 2016, conocida como "megasequía", el cual aportará en el entendimiento de las sequías meteorológicas en gran parte del territorio chileno.

Es relevante además recalcar la importancia de realizar estudios del comportamiento de sequías en Chile mediante la caracterización por medio de índices, los cuales están orientados a identificar medidas adecuadas para mitigar los efectos de una sequía y para adaptarse mediante estrategias de gestión y reducción de riesgo de desastres. Dentro de este enfoque, esta investigación sirve como un aporte fundamental para la elaboración de políticas nacionales o regionales para la gestión de la sequía.

2. ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO

El índice de precipitación estandarizado (o SPI por sus siglas en inglés) fue desarrollado por McKee et al. (1993) con la finalidad de mejorar la detección del inicio de un evento de sequía meteorológica y el monitoreo de su evolución.

El SPI representa el número de desviaciones estándar a partir del cual un valor de precipitación acumulada se desvía del promedio climatológico. Se obtiene ajustando una distribución tipo Gamma a la serie de precipitaciones para luego transformarla a una distribución normal con media cero y desviación estándar igual a uno. Los valores positivos del SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor.

En la Figura 1 se muestra el procedimiento para obtener el SPI de un mes y una escala de tiempo determinada a partir de un dato de precipitación acumulada. Los 520 mm de precipitación tienen una probabilidad acumulada de 0,82 según la distribución Gamma, lo que al corresponderla con la distribución normal, se obtiene un SPI de 0,9.

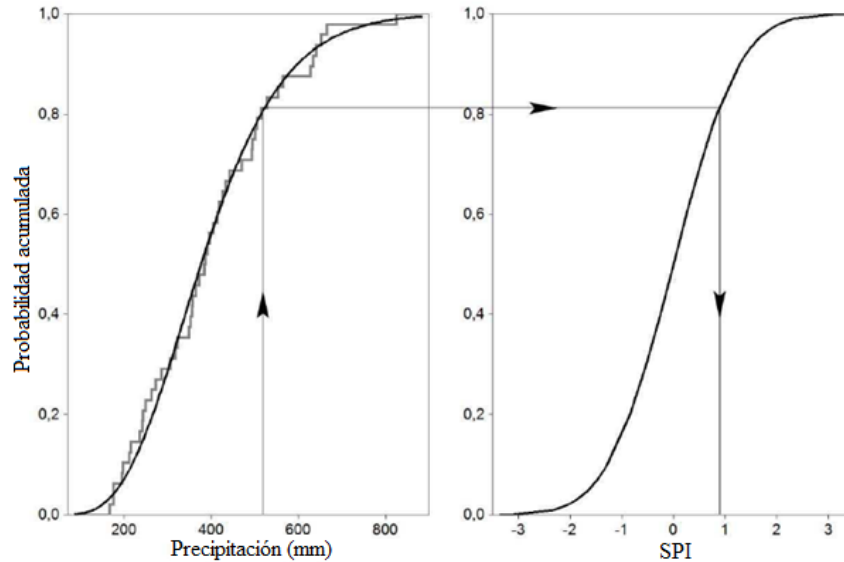


Figura 1. Procedimiento de cálculo del SPI desde una distribución Gamma (izquierda) a una distribución normal (derecha), según Rivera (2014).

Una de las ventajas que presenta este índice es que al estar normalizado, es posible cuantificar y comparar las intensidades de los déficits de precipitación entre zonas con climas diferentes.

Características en Común de un Índice de Sequía

Para describir de manera objetiva un período de sequía y poder comparar diferentes períodos, los índices presentan tres características en común, las cuales se describen a continuación y se muestran en la Figura 2, donde la línea naranja representa la serie de valores de un índice, la línea lila indica el umbral dado por debajo del cual se considera sequía, la magnitud del evento es el producto de la duración y la intensidad (área sombreada color marrón debajo del umbral).

Duración de una sequía

La duración se refiere al período durante el cual el índice se encuentra por debajo del umbral seleccionado. Mientras el índice no vuelva a superar dicho umbral, la duración de la sequía se alarga.

Intensidad de una sequía

La intensidad se refiere al promedio aritmético de valores del índice durante el período en el que se está por debajo del umbral seleccionado.

Magnitud de una sequía

La magnitud de un evento de sequía se refiere al acumulado de valores que toma el índice por debajo del umbral especificado (Barua et al., 2011).

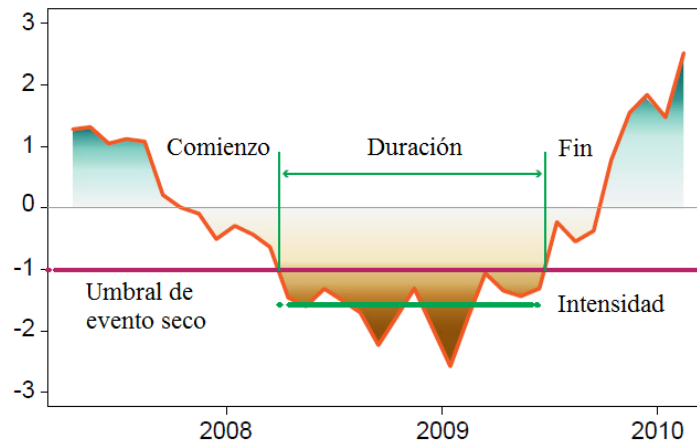


Figura 2. Características de un evento de sequía, según CRC-SAS (2016).

3. METODOLOGÍA

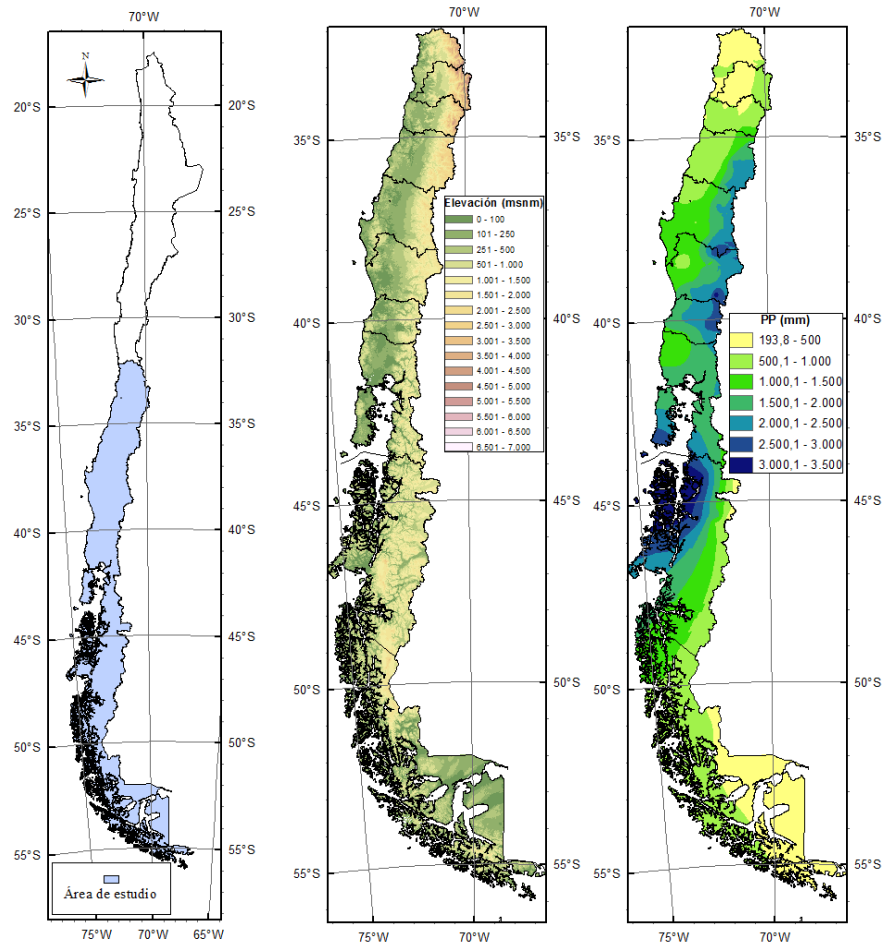
Área de Estudio

El área de estudio comprende la zona centro y sur de Chile entre los 32° hasta los 56° latitud sur, específicamente las regiones de Valparaíso, Metropolitana, de O'Higgins, del Maule, del Biobío, de la Araucanía, de Los Ríos, de Los Lagos, de Aysén y de Magallanes. En la Figura 3a se muestra la ubicación del área de estudio.

Según la clasificación de Köppen (DMC, 2010) el área de estudio tiene 5 climas primarios que incluyen el semiárido (BSk) en parte de la Región de Valparaíso, templado cálido o mediterráneo (Csb) en la zona central entre Valparaíso y Concepción, templado lluvioso cálido en la zona sur entre Temuco, Puerto Montt y la zona costera de la Región de Aysén, templado lluvioso frío (Cfc) en el extremo sur de Chile en la zona interior de la Región de Aysén y la zona costera de la Región de Magallanes, y frío de tundra (ET) en la zona más austral de la Región de Magallanes, además de zonas de la Cordillera de los Andes a lo largo de todo Chile.

La zona de estudio exhibe una topografía muy variable debido a la presencia de dos cordones montañosos importantes (Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes), oscilando entre los 0 y los 6110 m.s.n.m. (Figura 3b). Por otro lado, tomando en cuenta la precipitación anual, esta tiene una tendencia creciente hacia el sur, oscilando entre los 200 a 500 mm en la Región de Valparaíso, hasta los 3500 mm anuales en la zona costera de la Región de Aysén, y posteriormente sufriendo un descenso hacia la zona interior de la Región de Magallanes (Patagonia) con una media de 500 mm, tal como se muestra en la Figura 3c.

El principal origen de la precipitación en la zona de estudio son los sistemas frontales, registrando precipitaciones principalmente estacionales hasta el paralelo 39°S, cambiando a un régimen lluvioso todo el año hacia el sur. (DMC, 2010).



a) Ubicación

b) Topografía

c) Precipitación anual

Figura 3. Zona de estudio

Base de Datos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos mensuales de precipitación, registrados en 620 estaciones pluviométricas que pertenecen a la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Una gran cantidad de estas 620 estaciones presentó problemas en la cobertura temporal de sus registros, ya sea porque la longitud del registro era demasiado corta para realizar un análisis climatológico, o porque se presentaban discontinuidades en las mediciones durante días, meses o incluso años. Para el cálculo de índices de sequía, la OMM (2012) recomienda una longitud de registro entre 20 y 30 años para el cálculo del SPI, prefiriendo los registros más largos y los autores del mismo índice, McKee *et al.* (1993) sugieren que es ideal tener series de precipitación de al menos 30 años continuos, el cual fue el primer criterio usado para filtrar estaciones en este estudio.

Posteriormente, se realizó un análisis de consistencia y un relleno de datos faltantes, resultando en un total de 174 estaciones pluviométricas cuya distribución se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones seleccionadas

Región	Estaciones DGA	Estaciones DMC	Total
Valparaíso	34	0	34
Metropolitana	15	0	15
O' Higgins	17	0	17
Maule	27	0	27
Biobío	23	1	24
Araucanía	21	0	21
Los Ríos	5	4	9
Los Lagos	2	3	5
Aysén	9	2	11
Magallanes	10	1	11

Aplicación del SPI

Para el cálculo del SPI se usó el *software* SPI_SL_6.exe, el cual tiene como datos de entrada el registro de precipitaciones mensual durante los 32 años de estudio por estación, en formato *cor*, y como dato de salida el índice SPI calculado para todos los meses y para todas las escalas mencionadas anteriormente, en formato *dat*. Por lo tanto, fue necesario aplicar el *software* 174 veces (174 estaciones), obteniendo 174 planillas Excel con los resultados, con 2304 datos por estación.

Interpolación Espacial

Dentro del análisis espacio temporal de los índices, fue necesario generar mapas a partir de los valores puntuales de intensidad de los índices. Para esto, se realizaron interpolaciones espaciales en el *software* ArcGIS mediante el método de kriging ordinario, siguiendo la recomendación de Akhtari et al. (2008), los cuales realizaron una comparación de métodos de interpolación espacial referidos a índices de sequía, encontrando que el método de kriging ordinario era el método más preciso.

Categorización

Para la comparación de eventos de sequía es necesario una categorización de los valores para definir las distintas intensidades de un evento, la cual se presenta en la Tabla 2. La categorización del SPI es recomendada por la OMM (2012), sin embargo, para adaptar a las condiciones de evento de sequía según la Resolución DGA N°1674 del año 2012, se impuso el valor de -0,84 como umbral de sequía moderada.

Tabla 2. Categorías de sequía para el SPI

Categoría	SPI
Sequía extrema	$SPI \leq -2$
Sequía severa	$-2 < SPI \leq -1,5$
Sequía moderada	$-1,5 < SPI \leq -0,84$
Normal	$-0,84 < SPI \leq 0,84$
Moderadamente húmedo	$0,84 < SPI \leq 1,5$
Severamente húmedo	$1,5 < SPI \leq 2$
Extremadamente húmedo	$SPI > 2$

Análisis de la Megasequía

Se calculó la duración, intensidad y magnitud de todos los eventos de sequía por año en el período 1985-2016 en una escala de tiempo de 12 meses para las 174 estaciones. De este período se seleccionaron los años 2010 a 2016, en los cuales cada duración, intensidad y magnitud anual por estación posteriormente se guardó como una intensidad promedio y una duración y magnitud acumulada en tal período, generando por estación ocho magnitudes, intensidades y duraciones, siete para cada año entre 2010 y 2016 y uno para todo el período. Posteriormente, se generaron siete mapas anuales y un mapa del período completo para cada característica del evento de sequía.

4. RESULTADOS

Estaciones Afectadas

La Figura 4 presenta el porcentaje de estaciones afectadas por región administrativa durante el período 2010-2016 en el área de estudio, en la cual se resaltan con rojo los valores más altos del SPI y con verde los más bajos. Se observó que los años con menor número de estaciones afectadas por la sequía fueron el 2010 y el 2016 con un 55% y un 61%, respectivamente, mientras que la región con menor porcentaje de estaciones que presentaron sequía fue la de Magallanes con un 91%, siendo la estación Cerro Castillo (51,3° S) la única de todo el estudio que no presentó ningún evento de sequía durante los años antes mencionados. Cabe destacar que los eventos secos se concentraron principalmente en la zona central del área de estudio entre los años 2010 y 2015, para posteriormente desplazarse hacia el sur para el año 2016, afectando la totalidad de las estaciones del Biobío, Los Ríos, Los Lagos y Aysén (entre los paralelos 36° S y 49 °S).

% Estaciones	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Megasequía
Valparaíso	32%	59%	85%	74%	100%	97%	6%	100%
Metropolitana	47%	93%	87%	67%	100%	100%	0%	100%
O' Higgins	94%	94%	100%	76%	100%	100%	29%	100%
Maule	81%	85%	93%	93%	85%	93%	85%	100%
Biobío	58%	71%	100%	96%	88%	67%	100%	100%
Araucanía	57%	67%	90%	100%	76%	57%	95%	100%
Los Ríos	22%	44%	33%	44%	67%	44%	100%	100%
Los Lagos	22%	44%	33%	44%	67%	44%	100%	100%
Aysén	9%	9%	36%	27%	45%	36%	100%	100%
Magallanes	55%	18%	27%	27%	27%	36%	64%	91%
Total	55%	66%	80%	74%	82%	76%	61%	99%

Escala de colores y valores respectivos					
0%	20%	40%	60%	80%	100%

Figura 4. Porcentaje de estaciones afectadas por sequía

Duración de la Megasequía

Se evidenció que las zonas con mayor número de meses con sequía por año (según el índice SPI a 12 meses) son la Región del Biobío (37° S) durante el año 2013, las regiones de Valparaíso,

Metropolitana y O' Higgins (32° a 35° S) en el año 2014 y el área comprendida entre los 35°S hasta los 56°S (gran parte del área de estudio) durante el año 2016.

Con el fin de dar otra mirada a los resultados obtenidos, se presenta la Figura 5 con la duración de la sequía por año y por región administrativa en el período de estudio, observándose que los años 2010 y 2015 fueron los menos afectados por la sequía, con un promedio de 2 meses por año, mientras que el año 2014 fue el año con mayor número de meses con 5.

Duración (meses)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Megasequía
Valparaíso	1	2	3	3	8	3	0	21
Metropolitana	2	5	4	1	7	4	0	23
O' Higgins	3	5	4	2	6	4	1	25
Maule	3	3	4	3	3	2	4	23
Biobío	3	4	6	7	4	3	7	33
Araucanía	2	3	5	7	3	2	6	28
Los Ríos	1	3	3	3	2	2	6	19
Los Lagos	2	2	1	0	2	1	7	16
Aysén	0	0	1	2	3	3	9	18
Magallanes	5	0	2	1	1	1	4	15
Media	2	3	4	4	5	2	4	24

Escala de colores y valores respectivos (meses)				
0	3	6	9	12

Figura 5. Cantidad de meses en sequía por año y en período completo

Finalmente, al tomar el acumulado de las duraciones de todo el período 2010-2016, se obtuvo que la zona con una mayor duración de sequía es principalmente la Región del Biobío, con 33 meses con condiciones secas. Esto quiere decir que un 41% del tiempo se estuvo bajo condiciones de sequía. Por otro lado, la amplia zona con la menor duración de sequía es entre las Regiones de los Ríos y de Magallanes (40°S a 56°S), con valores entre los 12 y los 23 meses, esto es entre un 14 y un 27% del total del tiempo en el período 2010-2016. Estos resultados se presentan en la Figura 6a.

Intensidad de la Megasequía

La distribución espacial de la intensidad en el período 2010-2015 exhibió una gran parte de la región de estudio con condiciones normales principalmente al sur del paralelo 39° S, concentrando los eventos de sequía moderada (SPI entre -1,5 y -0,84) hacia el norte. Sin embargo, para el año 2016, el patrón de intensidad cambia, presentando condiciones severas y extremas en gran parte del territorio, siendo a simple vista la Región de Aysén la que presenta una mayor intensidad de sequía. Para representar mejor estos resultados, se expone la Figura 7 con la intensidad media por año y por región administrativa en el período de estudio, observándose que los años 2014, 2015 y 2016 presentaron la mayor intensidad, mientras que la región con mayor intensidad durante los 7 años de estudio fue la Región de Aysén, con una media de -1,66. Cabe mencionar que los valores mediante los cuales se calculó el promedio toman valores de 0 y de -0,84 o menores, por lo que no se consideraron los valores positivos del índice.

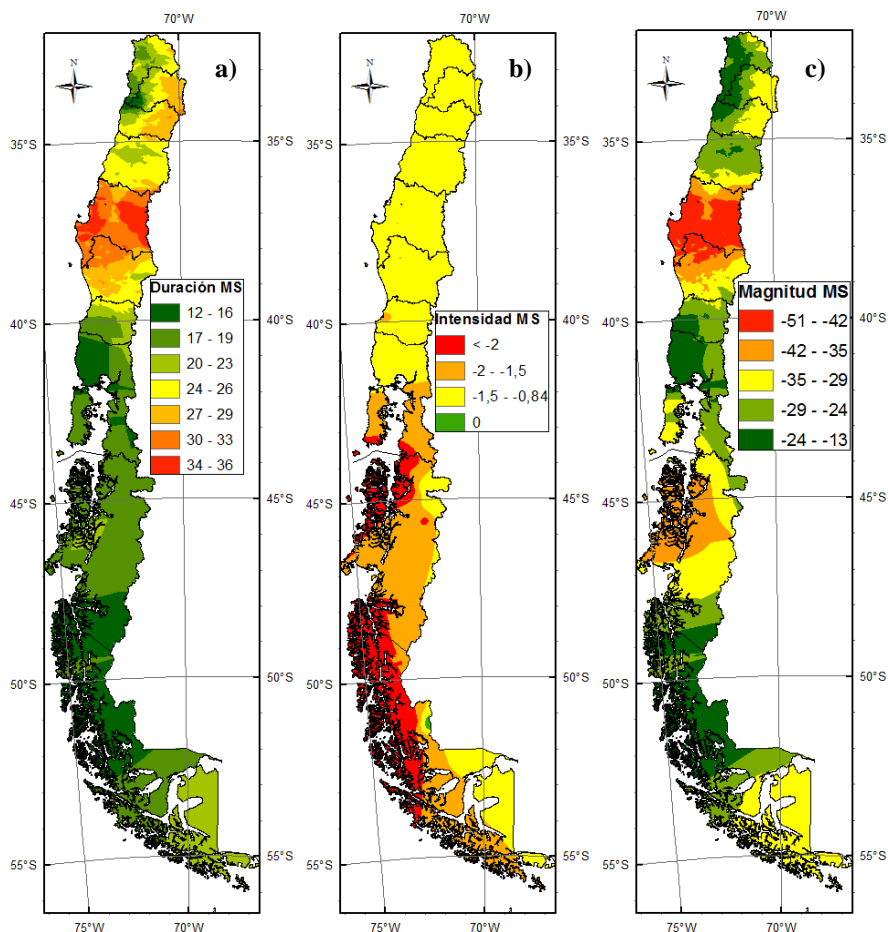


Figura 6. Duración (en meses), intensidad promedio y magnitud acumulada de megasequía (2010-2016)

Intensidad (SPI)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Megasequía
Valparaíso	-0,31	-0,57	-0,91	-0,73	-1,23	-1,40	-0,05	-1,16
Metropolitana	-0,46	-1,00	-0,93	-0,63	-1,22	-1,29	0,00	-1,13
O' Higgins	-0,94	-1,08	-1,13	-0,82	-1,15	-1,32	-0,29	-1,13
Maule	-0,84	-0,90	-1,10	-0,99	-0,91	-1,06	-1,21	-1,14
Biobío	-0,64	-0,78	-1,28	-1,23	-1,12	-0,79	-1,61	-1,30
Araucanía	-0,68	-0,78	-1,08	-1,26	-0,95	-0,60	-1,47	-1,26
Los Ríos	-0,21	-0,45	-0,36	-0,51	-0,68	-0,49	-1,61	-1,29
Los Lagos	-0,88	-0,73	-0,42	-0,21	-0,62	-0,43	-1,86	-1,30
Aysén	-0,10	-0,09	-0,45	-0,34	-0,62	-0,52	-2,21	-1,66
Magallanes	-0,74	-0,22	-0,39	-0,31	-0,31	-0,53	-1,17	-1,41
TOTAL	-0,58	-0,71	-0,93	-0,83	-0,98	-0,97	-0,98	-1,24

Categoría de sequía según SPI			
Extrema	Severa	Moderada	Normal

Figura 7. Intensidad de sequía por año y en período completo

Por otro lado, se observaron algunas inconsistencias al comparar los mapas de duración e intensidad, por ejemplo, en la Región de Los Ríos (40° S) el mapa de duración para el año 2012 presenta una duración en promedio de 3 a 4 meses, mientras que el mapa de intensidad presenta un valor igual a 0. Esto se genera debido a que la amplitud de los valores de duración es alta (entre 0 y 12 meses), mientras que los valores de intensidad varían entre 0 y -1,15 (estaciones Lago Riñihue y Purulón Escuela Agrícola, 39,8° S y 39,5° S, respectivamente), tomando como intensidad nula todos los valores entre 0 y -0,84, según la clasificación "normal" del índice SPI (ver Figura 8).

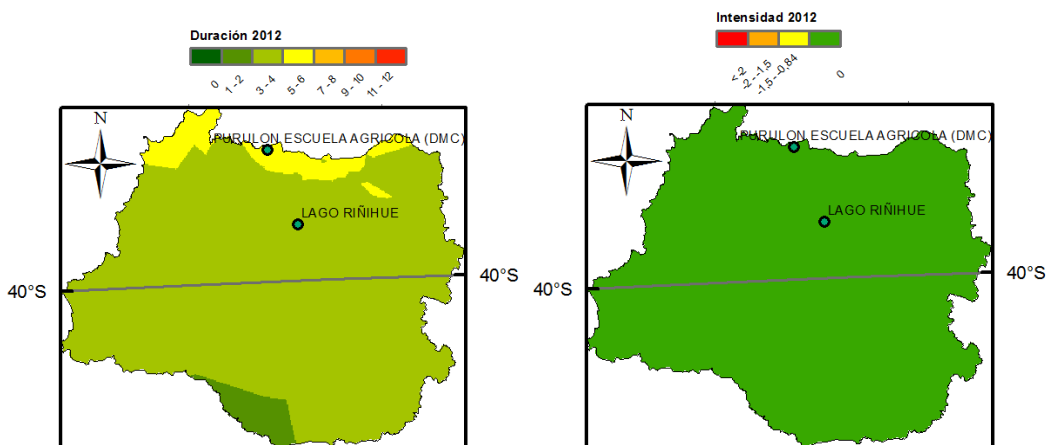


Figura 8. Comparación de duración e intensidad en la Región de Los Ríos, año 2012

Para finalizar, la intensidad promedio de todo el período evidenció que las zonas con la mayor intensidad de sequía son la zona occidental de la Región de Magallanes y la zona noroeste de la Región de Aysén, con intensidades menores a -2, es decir, de sequía extrema (Figura 6b).

Magnitud de la Megasequía

En el caso de la magnitud de la sequía por año, se observó un patrón similar entre los años 2010 y 2015 en el territorio comprendido entre las Regiones de Valparaíso y Los Ríos (entre 32°S y 41°S), evidenciando la presencia de un evento de sequía, mientras que en la Región de Aysén (44°S a 49°S) presentó magnitudes iguales a cero en los años 2010 y 2011. Lo más llamativo son los valores de magnitud para el año 2016, en donde se producen los máximos entre las Regiones de O' Higgins y Magallanes (35°S a 56°S), especialmente en la Región de Aysén.

Para representar mejor los resultados, se expone la Figura 9 con la magnitud por año y por región administrativa en el período de estudio, observándose que los años 2014 y 2016 son los que presentan la mayor magnitud, promediando todas las estaciones, con -5,7 y -6,46. Cabe destacar la gran magnitud de la sequía que se produjo el año 2016 en Aysén, alcanzando un valor de -21,3, siendo la mayor magnitud por región observada en todo el período de estudio, corroborándose con los resultados de duración e intensidad en la misma zona, alcanzando valores extremos.

Magnitud (SPI)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Megasequía
Valparaíso	-0,81	-2,31	-3,64	-3,44	-10,07	-4,39	-0,16	-24,81
Metropolitana	-1,73	-5,25	-4,50	-1,38	-8,67	-4,77	0,00	-26,31
O' Higgins	-3,18	-6,01	-4,59	-2,64	-6,76	-4,61	-0,88	-28,66
Maule	-3,47	-3,54	-4,80	-3,51	-3,76	-1,83	-6,21	-27,13
Biobío	-3,14	-4,29	-8,45	-9,81	-4,98	-3,13	-10,97	-44,77
Araucanía	-3,19	-3,95	-6,08	-8,79	-4,48	-2,15	-9,06	-37,70
Los Ríos	-0,64	-2,69	-3,04	-3,09	-2,50	-1,97	-10,36	-24,29
Los Lagos	-2,40	-2,68	-1,51	-0,41	-1,89	-1,66	-13,70	-24,26
Aysén	-0,10	-0,46	-1,71	-2,37	-4,47	-4,16	-21,27	-34,54
Magallanes	-6,48	-0,56	-2,49	-1,09	-1,89	-2,15	-7,95	-22,60
TOTAL	-2,49	-3,39	-4,66	-4,40	-5,77	-3,24	-6,46	-30,42

Escala de colores y valores respectivos (SPI)					
-24	-20	-16	-8	-4	0

Figura 9. Magnitud de sequía por año y en período completo

Finalmente, la magnitud del período completo (Figura 6c), esto es al tomar el acumulado de magnitudes entre los años 2010 y 2016, mostró que la zona con mayor magnitud de sequía fue la Región del Biobío (36°S a 38°S), con un valor de -44,8, seguida por la zona norte de la Región de la Araucanía, promediando una magnitud de -37,7 en toda la región. Otra zona de interés es la costa de la Región de Aysén (44°S a 47°S), sin embargo, dada la escasez de estaciones pluviométricas en la zona de Aysén, lo anterior es válido sólo para la Región del Biobío y la Araucanía, la cuales efectivamente presentan una gran densidad de estaciones. Por el contrario, la zona con menor magnitud acumulada es la costa de la Región de Valparaíso, O' Higgins, norte de Los Lagos y sur de La Araucanía.

Comparación con la Sequía 1998-1999

Con la finalidad de realizar una comparación de la megasequía con algún otro evento similar, se seleccionó la sequía de los años 1998 y 1999 (detectada por el SPI). Este evento de sequía coincidió con un evento ENOS (El Niño Oscilación del Sur) en su fase fría (La Niña), el cual provoca generalmente una escasez de precipitaciones en la zona de estudio (Rutllant, 2004). Para la comparación, se elaboraron mapas de duración, intensidad y magnitud para el año 1999 y para el período 1998-1999, y se contrastaron con los años más afectados por la megasequía (2014 y 2016).

La sequía 1998-1999 afectó casi a toda el área de estudio, a excepción de la Región de Aysén y la zona norte de la Región de Magallanes, mientras que la megasequía abarcó toda el área de estudio, sin excepción. Respecto a la duración por año, según la Figura 10, se observó que durante el año 1999, en su mayor parte, la sequía comprendió entre 7 y 10 meses, con algunos máximos de 12 meses en las regiones de Los Ríos y Los Lagos (40°S y 42°S), mientras que en el acumulado de 1998-1999, la media se encuentra entre los 13 y 16 meses, evidenciando que el año 1999 tuvo una mayor relevancia en la sequía. Al comparar con los años 2014 y 2016, se evidenció que en algunas zonas durante la megasequía se igualó la duración del año 1999. Sin embargo, al tomar el acumulado de los años 2010-2016, la duración aumenta considerablemente.

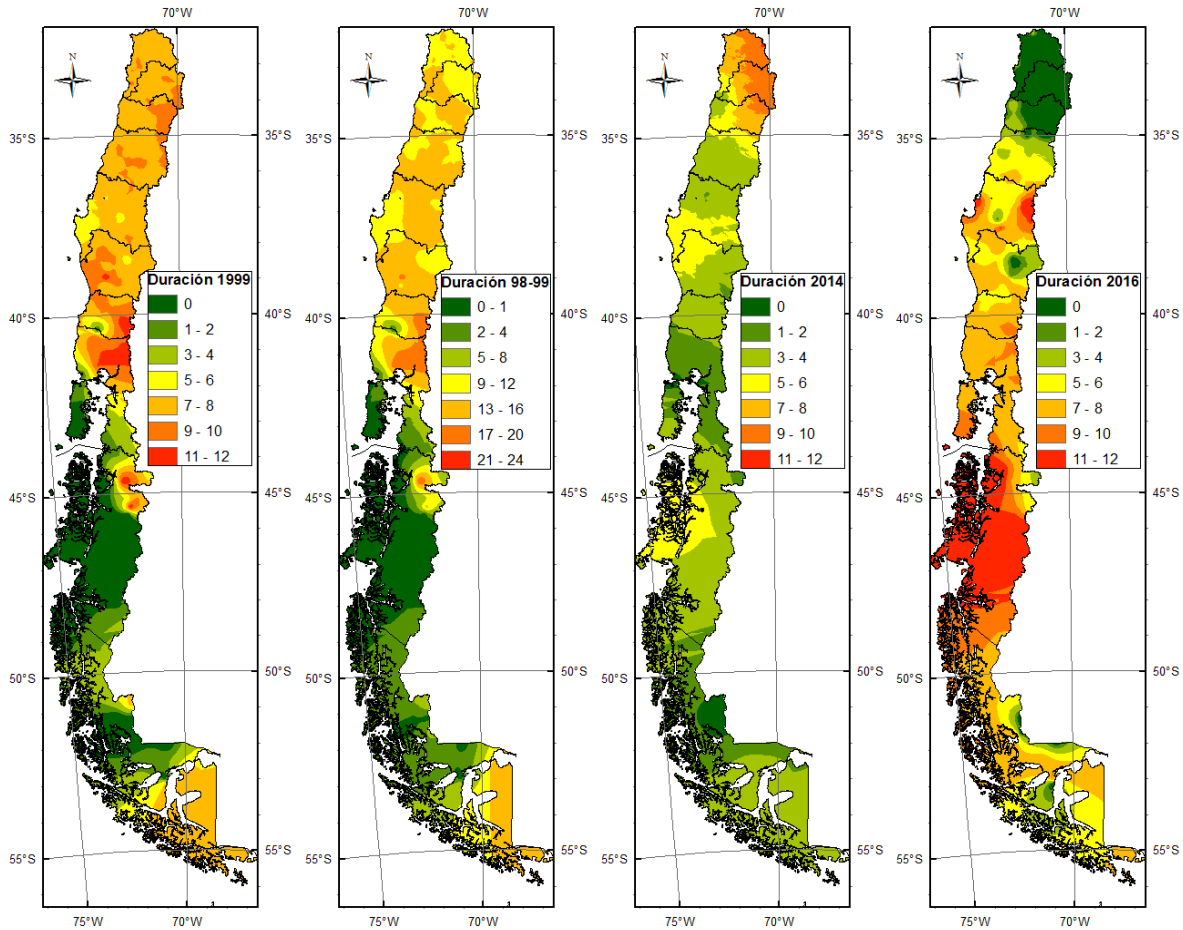


Figura 10. Duración (en meses) de la sequía, según el SPI, de los años 1999, período 1998-1999, 2014 y 2016.

En cuanto a la intensidad, la sequía de 1999 es considerablemente mayor a la megasequía, obteniendo valores extremos en gran parte de la zona de estudio, entre las Regiones de Valparaíso y Los Ríos (32°S a 40°S) (Figura 11), esto es, dos categorías mayor a la megasequía (valores moderados). La otra gran diferencia en los mapas de intensidad es la ubicación de los mayores valores, ya que en 1999 se ubican en la zona antes nombrada, mientras que en 2016 se concentran entre las regiones de Los Lagos y Magallanes (40°S a 56°S).

Finalmente, al comparar los valores de magnitud (Figura 12), se observó que los valores en el año 1999 son semejantes a los obtenidos en el año 2016, principalmente entre las regiones del Biobío y Los Lagos (36°S a 44°S), con un valor promedio de -20. La Tabla 3 muestra los valores acumulados de magnitud para los dos eventos, mostrando que este valor para la megasequía es un 33% mayor que la magnitud de la sequía 1998-1999. La principal diferencia es que, como la magnitud es el producto entre la intensidad y la duración, y en consideración a que la megasequía abarca un gran período de tiempo, la magnitud final obtenida en los 7 años es superior a la obtenida en el año 1999 o los años 1998-1999 (notar colores con sus respectivos valores en Figura 12).

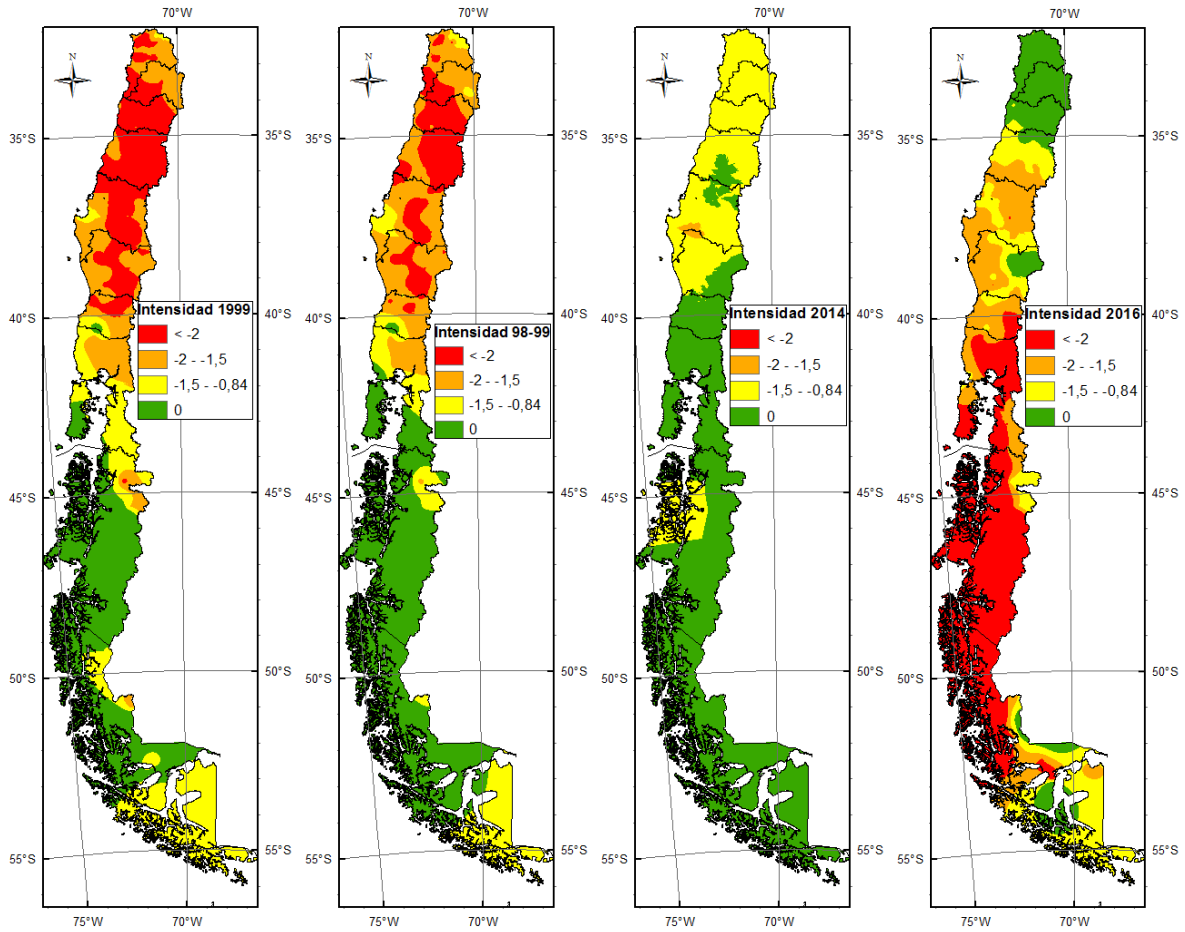


Figura 11. Intensidad promedio (por período) de la sequía, según el SPI, de los años 1999, período 1998-1999, 2014 y 2016.

Tabla 3. Comparación de magnitudes de sequías, 1998-1999 y 2010-2016

Período analizado	Megasequía	Sequía 1998-1999
Magnitud acumulada	-30,42	-22,9
Diferencia porcentual	+ 32,9 %	-

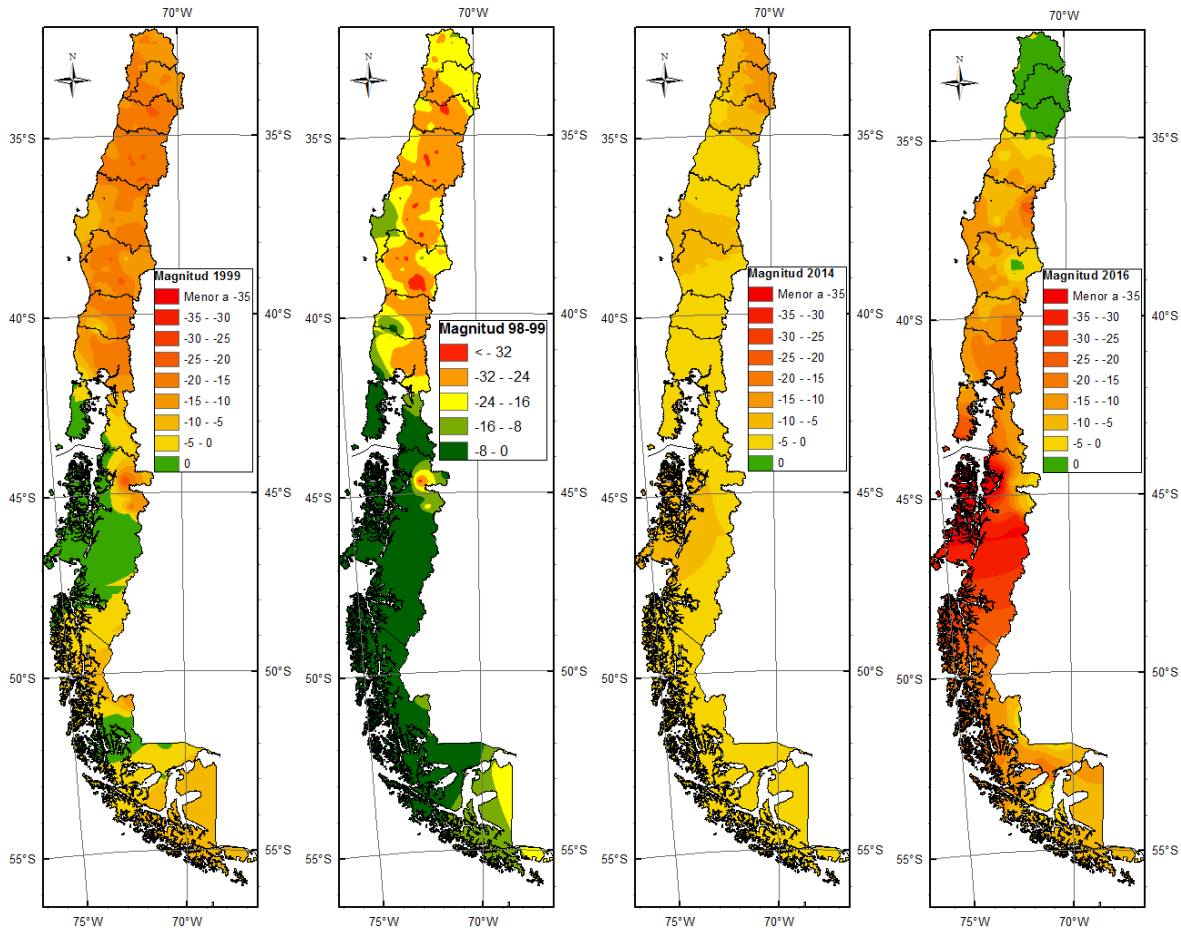


Figura 12. Magnitud acumulada (por período) de la sequía, según el SPI, de los años 1999, período 1998-1999, 2014 y 2016.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis reveló que en los años 2012 y 2014 se presentó el mayor porcentaje de estaciones afectadas por la sequía y que, en los 7 años considerados, sólo 1 estación no presentó condiciones de sequía. En conclusión, la sequía afectó al 99,4% de las estaciones consideradas. Analizando la intensidad promediada por estaciones, se concluye que esta no es un buen indicador para la medición de una sequía, ya que arroja inconsistencias con los mapas de duración, intensidad y magnitud, al promediar una intensidad clasificada como normal, pero con una magnitud que sí indica la presencia de un evento seco.

En resumen, hubo sequía en la totalidad del área de estudio, con una intensidad de clasificación moderada y de duración y magnitud variables durante los años. Considerando estas tres características, se obtiene que los años 2014 y 2016 fueron los más afectados por la sequía, mientras que los años 2010 y 2015 los menos afectados, que no quiere decir que no estén en presencia de un evento de sequía.

Por otra parte, al tomar el acumulado de magnitudes en todo el período, la zona con mayor magnitud es la Región del Biobío y la zona norte de la Araucanía (36°S a 38°S), la cual varía entre -42 y -51, seguida por la zona costera de la Región de Aysén, con valores entre -35 y -42. Sin embargo, dada la escasez de estaciones pluviométricas en la zona de Aysén, lo anterior es válido sólo para la Región del Biobío y la Araucanía, las cuales efectivamente presentan una gran densidad de estaciones. Se recomienda extender la base de datos con estaciones ubicadas en zonas "sombra", las cuales actualmente no poseen la cantidad mínima de años con datos de precipitación mensual.

Finalmente, al comparar la megasequía con la sequía ocurrida en los 1998 y 1999, se concluye que esta última tuvo una extensión espacial menor, con una intensidad mayor, clasificada como extrema. Sin embargo, dada la mayor extensión temporal de la megasequía (siete años continuos), la magnitud acumulada de esta es un 33% mayor que la sequía 1998-1999.

REFERENCIAS

- Akhtari, R., S. Morid, M. Mahdian y V. Smakhtin. 2008. Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *International Journal of Climatology*, 29, 135-145.
- Barua, S., A. W.M. Ng y B.J.C. Perera. 2011. Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra River catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(2), 15-226.
- Below, R., E. Grover-Kopec y M. Dilley. 2007. Documenting Drought-Related Disasters: A Global Reassessment. *The Journal of Environment & Development*, 16(3), 328-344.
- CR(2). 2015. Informe a la Nación: La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Chile.
- CRC-SAS. 2016. Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el CRC-SAS. Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur.
- DGA. 2012. Resolución DGA N° 1674 de 2012 establece nuevos criterios para calificar épocas de extraordinaria sequía. Dirección General de Aguas, Chile.
- DMC. 2010. Climatología de Chile. Dirección Meteorológica de Chile.
- McKee, T.B., N.J. Doesken y J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings 8th Conference on Applied Climatology*. Anaheim, California, Estados Unidos.
- National Drought Mitigation Center. 2012. SPI_SL_6.exe. University of Nebraska-Lincoln.
- OMM. 2012. Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-N° 1090). Organización Meteorológica Mundial. (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- Rivera, J.A.. 2014. Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica: Análisis regional y proyecciones futuras. Tesis doctoral. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Rutllant, J.A.. 2004. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. El Niño-La Niña 1997-2000: Su efecto en Chile. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso, Chile