



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

Análisis actual y proyecciones de la temperatura y precipitación del Norte Grande y su Altiplano en Chile. Variabilidad (1970-2013) y Cambio Climático en el escenario futuro RCP 8.5 (2080)

Memoria para optar al título de Geógrafo

Daniela Villalobos Terrazas

Profesor Guía: Pablo Sarricolea Espinoza

Santiago de Chile
Julio 2016

DEDICATORIA

*A mi hija Helena
Te Amo infinitamente*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Yubinza y José por alentar, acompañar, guiar en este nuevo desafío. Gracias por no perder nunca la fe en mí, los amo.

A mis hermanas Jessica y Melisa por ser fuente infinita de risas y aterrizadas cuando las necesite.

A mi tía Ximena y mami Haydeé por brindarme ayuda cuando la necesité.

A mi profesor guía Pablo Sarricolea por su infinita paciencia, consejos y conocimiento, ya que gran parte de lo investigado en estas páginas se lo debo a usted.

A mis amigos Anita, Isabel, Diego, Cristóbal gracias por su compañía y amistad, sin ustedes este camino hubiese sido más largo y difícil.

A Pablo mi fiel compañero, que durante cinco años me ha apoyado, superando las vicisitudes que se nos han puesto en el camino, pero que siempre, siempre supo ser el sostén que necesité cuando mis fuerzas se agotaban, te amo.

Y a todos aquellos que me brindaron alegrías y buenos momentos en estos años de vida universitaria.

!!!!!!Gracias Totales!!!!!!

ÍNDICE

ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	6
RESUMEN	8
CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Planteamiento del problema	10
1.3 Área de estudio	11
1.4 Objetivos.....	13
1.5 Hipótesis	13
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO.....	14
2.1. El Cambio Climático y sus consecuencias en Sudamérica y Chile	14
2.2. Variabilidad en el clima del Altiplano Chileno	17
2.3. Teleconexiones y su dominio en el clima del Norte Grande.	19
2.3.1. El Niño Oscilación del Sur (ENSO)	22
2.3.2. Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).....	27
2.3.3. Índice Monzón Sudamericano	29
2.4. Escenarios climáticos y variables de análisis de cambios climáticos	31
2.4.1. Escenarios Futuros.....	33
2.4.2. Modelos de Circulación General (GCM) y Atmosfera-oceánicos MCGAO).....	34
2.4.3. Modelo Circulación General CSIRO ACCESS 1.3	36
2.5. Sensibilidad Ambiental en los ecosistemas altoandinos.....	37
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.1. Materiales	39
3.2.- Métodos.....	41
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	48
4.1. Caracterización de comportamientos y patrones de la precipitación y temperatura en el Norte Grande y el Altiplano Chileno.....	48
4.1.1 Tendencias en temperatura en el Norte Grande de Chile	48
4.1.2. Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile.....	63
4.2. Teleconexiones y su influencia en las precipitaciones en el Norte Grande de Chile.....	85

4.3. Cambios y Escenario Futuro (RCP 8.5) esperados para Norte Grande de Chile según Modelo de circulación global CSIRO ACCESS 1.3 al año 2080.....	94
a) Temperatura media anual (BIO 1).....	94
b) Temperatura del mes más cálido (BIO 5).....	96
c) Temperatura del mes más frío (BIO 6).....	98
d) Precipitación anual (BIO 12).....	100
e) Precipitación del trimestre húmedo (BIO 16).....	102
f) Precipitación del trimestre seco (BIO 17).....	104
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	106
5.1. Discusión.....	106
5.2. Conclusiones.....	109
Bibliografía.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Área de Estudio.....	12
Figura 2 a. Cambio en la temperatura media en superficie 1986 - 2005 a 2081 – 2100. A la izquierda se muestra el RCP 2,6 mientras que a la derecha el RCP 8,5. Fuente: (IPCC, 2013)....	16
Figura 3 Precipitación en la región altiplánica en áreas adyacentes.....	19
Figura 4. Esquema Condición El Niño versus La Niña.....	22
Figura 5. Modelo de viento, precipitación y temperatura del mar en las fases ENSO.....	24
Figura 6. Índice Oscilación del Sur desde 1970 a 2010.....	25
Figura 7. Índice ENSO multivariado 1950 - 2015.....	25
Figura 8. Diferencias entre El Niño y El Niño Modoki.....	26
Figura 9. Zonas del ENSO en el Océano Pacífico.....	27
Figura 10. Condiciones típicas en el océano Pacífico durante las fases positiva (izquierda) y negativas (derecha) de la PDO.	28
Figura 11. Índice Monzón de América del Sur (1948 - 2012).....	29
Figura 12. Monzón sudamericano en el mes de Diciembre.....	29
Figura 13. Monzón sudamericano en el mes de febrero.....	30
Figura 14. Monzón sudamericano en el mes de Marzo.....	30
Figura 15. Escenarios Climáticos y Familias.....	32
Figura 16. Proyección de escenarios de forzamiento radiativo.....	34
Figura 17 Representación esquemática de los impactos del cambio climático y su relación con las proyecciones climáticas futuras.....	38
Figura 18. Tendencia en Precipitaciones a 30 años.....	84
Figura 19. Índice Oscilación del Sur.....	88
Figura 20. Oscilación Decadal del Pacífico.....	89
Figura 21. Índice ENSO Multivariado.....	90
Figura 22. Índice Monzón Sudamericano SASM.....	91
Figura 23. Índice El Niño 3.4.....	92

Figura 24. Índice Modoki	93
Figura 25. Temperatura media anual BIO1	95
Figura 26. Temperatura del mes más cálido BIO5	97
Figura 27. Temperatura del mes más frío BIO6	99
Figura 28. Precipitación anual BIO12	101
Figura 29. Precipitación trimestre húmedo BIO16.....	103
Figura 30. Precipitación trimestre seco BIO17.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fenómenos meteorológicos y climáticos extremos	15
Tabla 2 Escalas de variabilidad climática.....	18
Tabla 3 Patrones de variabilidad de baja frecuencia que afectan a Chile	21
Tabla 4. Principales características de las fases frías y cálidas del ENSO	23
Tabla 5. Comparación entre Modelos Climáticos Simples y Complejos	35
Tabla 6. Estaciones pluviométricas del Norte Grande.....	39
Tabla 7. Estaciones Térmicas del Norte Grande.....	40
Tabla 8. Medidas estadísticas calculadas para precipitación y temperatura.....	42
Tabla 9. Distribución Geográfica de las Estaciones Meteorológicas	43
Tabla 10 . Desfase de los índices de Teleconexiones utilizadas.....	43
Tabla 11. Tabla resumen Temperatura Mínima.....	59
Tabla 12. Tabla resumen Temperaturas máximas	61
Tabla 13. Tabla Resumen tendencia en Precipitaciones a 30 años.....	83
Tabla 14. Teleconexión y Ecuaciones	85
Tabla 15. Estaciones y Teleconexiones influyentes para cada una	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Temperaturas mínimas estación Chacalluta	49
Gráfico 2. Temperaturas Máximas Estación Chacalluta	50
Gráfico 3. Temperaturas mínimas Estación Diego Aracena.....	51
Gráfico 4. Temperaturas Máximas Estación Diego Aracena	51
Gráfico 5. Temperaturas Mínimas Estación Cerro Moreno.....	52
Gráfico 6. Temperaturas Máximas Estación Cerro Moreno.....	52
Gráfico 7. Temperatura Mínima Estación Azapa	53
Gráfico 8. Temperatura Máxima Estación Azapa	54
Gráfico 9. Temperaturas Mínimas Estación Codpa.....	55
Gráfico 10. Temperatura Máxima Estación Codpa	55
Gráfico 11. Temperatura mínima Estación Parshall.....	56
Gráfico 12. Temperatura Máxima Estación Parshall.....	57
Gráfico 13. Temperatura Mínima Estación El Loa.....	58
Gráfico 14. Temperatura Máxima Estación El Loa.....	58
Gráfico 15. Precipitación Estación Chacalluta	64
Gráfico 16. Precipitación Estación Diego Aracena	65
Gráfico 17. Precipitación Estación Cerro Moreno.....	66

Gráfico 18. Precipitación Estación Codpa.....	67
Gráfico 19. Precipitación Estación Humapalca	68
Gráfico 20. Precipitación Estación Alcérreca.....	69
Gráfico 21. Precipitación Estación Chapiquia.....	70
Gráfico 22. Precipitación Estación Belén	71
Gráfico 23. Precipitación Estación Lequena.....	72
Gráfico 24. Precipitación Estación Parshall	73
Gráfico 25. Precipitación Estación Toconce.....	74
Gráfico 26. Precipitación Estación Ayquina.....	75
Gráfico 27. Precipitación Estación El Loa.....	76
Gráfico 28. Precipitación Estación Visviri	77
Gráfico 29. Precipitación Estación Cotacotani	78
Gráfico 30. Precipitación Estación Chucuyo	79
Gráfico 31. Precipitación Estación Guallatirre	80
Gráfico 32. Precipitación Estación Coyacagua.....	81
Gráfico 33. Precipitación Estación Inacaliri	82

RESUMEN

El cambio y variabilidad climática son fenómenos que afectan a todo el planeta, provocando entre otros efectos, cambios importantes en las condiciones normales del clima, por ejemplo, acentuando condiciones extremas de sequía e inundaciones. Dentro de las zonas más amenazadas a estos cambios, el norte grande y su altiplano chileno podrían manifestar una alta probabilidad de sufrir severas transformaciones, con alzas importantes en su temperatura y aumento de la variabilidad de episodios pluviométricos.

Utilizando la proyección de las superficies climáticas generadas por Pliscoff *et al.* (2014), y la proyección del Modelo de Circulación Atmosférica Global (GCM) del CSIRO ACCESS 1.3 para el escenario RCP 8.5, fue posible visualizar los cambios proyectados para el 2080, y sus efectos en los ecosistemas presentes, verificando patrones de disminución de gran parte de la precipitación y aumento de su variabilidad, y por otra parte, alza de la temperatura para el norte grande, en especial en el altiplano.

Palabras Clave: Ambientes sensibles, Variables bioclimáticas, Cambio Climático, variabilidad climática, Norte Grande, Altiplano Chileno.

ABSTRACT

Climate variability and change are phenomena that affect the entire planet, causing among other things, significant changes in normal weather conditions, for example, emphasizing extreme conditions of drought and flooding. Among the most threatened areas to these changes, the big northern Chilean Altiplano and could show a high probability of severe transformations, with significant increases in temperature and increased variability of rainfall episodes.

Using the projection of surfaces generated by weather Pliscoff *et al.* (2014), and the projection of Circulation Model Global Atmospheric (GCM) CSIRO ACCESS 1.3 for the RCP 8.5 scenario was possible to visualize the changes projected for 2080, and its effects on the ecosystems, checking patterns decrease high of the rainfall and increased variability, and on the other hand, the temperature rise for the big north, especially in the highlands.

Keywords: sensitive environments, bioclimatic variables, Climate Change, climate variability, Norte Grande, Chilean Altiplano.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

La principal motivación que dirige esta investigación es conocer los escenarios climáticos futuros a fines de siglo XXI en el norte grande y altiplano de Chile, y así vislumbrar cuales ambientes serán los más sensibles al Cambio Climático ubicados en ésta zona

El interés de la autora por ambientes sensibles se gesta en los últimos años de universidad, cuando las cátedras se hacen aún más específicas y muestran mayor variedad de líneas de investigación para el desarrollo profesional. Es así, como la profundización en conocer ecosistemas vulnerables y su estrecha relación con aspectos físicos como la climatología, edafología, hidrología y biogeografía, motivan aún más el estudio de los humedales Altoandinos y otras formaciones del norte grande de Chile.

En este documento se ve plasmado el inicio vocacional por la Geografía Física y Ambiental, focalizada en los cambios y la variabilidad climática, y como ella, afectan a los diversos ecosistemas presentes en el país.

Dentro de este contexto, esta memoria se enmarca en los proyectos FONDECYT Regular N° 1120204 “Análisis Multiescalar de los Cambios Climáticos y su consideración en la Planificación Ambiental Estratégica del Desarrollo Regional Sustentable del Altiplano del Norte de Chile”, y FONDECYT Regular N°1150701 “Investigación participativa a través de observatorios ecológico-sociales de los cambios y variabilidades climáticas del altiplano andino del Norte de Chile”, siendo los objetivos disponer de una Evaluación Ambiental Estratégica multiescalar y mejorar el conocimiento de la Variabilidad y el Cambio Climático en una región de alta incertidumbre.

El documento está conformado de cinco capítulos, distribuidos de manera que el primer capítulo, consta de una presentación del tema y traza los lineamientos a seguir. El segundo capítulo, es un estado del asunto, donde se abordarán temas como el cambio climático, modelos climáticos, variables bioclimáticas y sensibilidad ambiental. El tercer capítulo, corresponde al planteamiento metodológico en detalle que se lleva a cabo para responder a los objetivos planteados. El cuarto capítulo, uno de los más importantes, son los resultados que hacen validar o desmentir la hipótesis propuesta y finalmente el quinto capítulo, compuesto por una discusión de los resultados, y se cierra con las conclusiones pertinentes.

1.2 Planteamiento del problema

El altiplano chileno y norte grande está inserto en una región con gran incertidumbre, donde la cuantificación de datos de precipitación y temperatura, no son suficientes para medir de manera fidedigna la variabilidad y la tendencia de éstas en un futuro.

De esta manera, según lo expuesto por el último informe de evaluación del panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2013), afirma que América del Sur sufrirá un incremento de las temperaturas en todo el continente antes de fin de siglo XXI, presentando las mayores alzas en el sureste del Amazonas; aumento de las precipitaciones de octubre a marzo en el sur de Brasil, cuenca de la Plata y sur de Chile y presentando una disminución de éstas en el extremo norte de Sudamérica, Chile central y norte de Brasil (IPCC, 2013); señalando, incluso, que la precipitación disminuirá en la mayor parte de Sudamérica, principalmente al norte de los 20°S, sugiriendo una temporada primavera-verano más larga y seca, indicando además un aumento de las precipitaciones extremas en el continente.

Este resultado complementa lo ya mencionado en el *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*, (2006) donde se especifica que la temperatura aumentará en todo el Norte grande, afectando principalmente al Altiplano alcanzando temperaturas promedio sobre los 30°C en los meses de junio a diciembre, subiendo en promedio hasta 6°C. (Garreaud, et al., 2008). En cuanto a las precipitaciones estivales, estas tendrán un aumento, sobre todo en el sector Norte del Norte Grande y Altiplano durante los meses de septiembre a marzo de entre 120 a 150%, y de un 130 a 200% en el sector Sur del área mencionada (Garreaud, et al., 2009)

Sarricolea y Romero (2015), por su parte, afirman que la variabilidad actual de las precipitaciones se torna insuficiente, y sólo la noción de las tendencias permitirá conocer el fenómeno a cabalidad, comprobando o desmintiendo aumento y disminuciones en las variables de temperatura y precipitación.

La existencia de pocos datos en precipitación y temperatura, sólo impiden registrar tendencia alguna de variación interanual (Romero, et al., 2012), sino que implican además una altísima incertidumbre, imposibilitando la creación de series de datos que permitan conocer la evolución de éstas en períodos superiores a 40 años.

Además, Vuillue *et al.* (2014), dejan de manifiesto un descenso en la temperatura de la costa del Norte Grande chileno de 0,20°C en los últimos 30 años, mientras que para el Altiplano se exhibe un aumento de las temperaturas en el mismo período, coincidiendo con lo expuesto por Romero et al. 2013, Sarricolea & Romero 2015 y el IPCC 2013.

Las observaciones citadas muestran tendencias las que permiten conocer el comportamiento actual de las precipitaciones y temperaturas; y estas últimas son correspondientes con los modelos de circulación global proyectados. Además las teleconexiones tales como el Niño Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el Monzón Sudamericano (SASM) entre otras son las que explican, en parte, la variabilidad de las precipitaciones, ejerciendo un dominio océano – atmósfera que intensifica o mitiga las variables en cuestión.

A partir de lo presentado, se propone un análisis de las tendencias climáticas actuales y sus proyecciones en precipitación y temperatura en el Norte grande y altiplano chileno, distinguiendo áreas más afectadas por éste.

1.3 Área de estudio

El norte grande y altiplano andino chileno corresponde a una unidad delimitada por la divisoria de aguas superficiales por el Este y el Océano Pacífico por el oeste. Este territorio se extiende entre los paralelos 17°30' y 27° S.

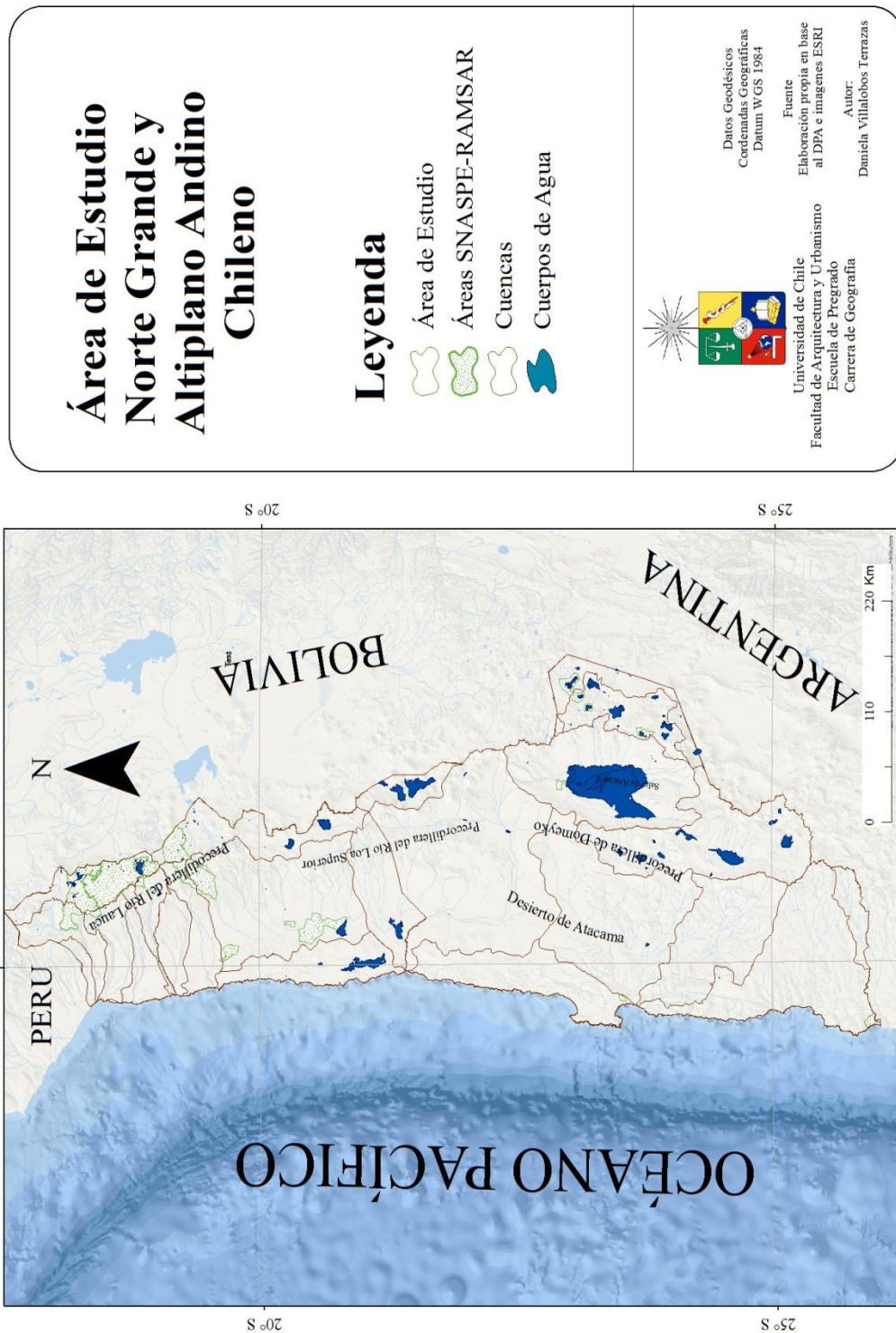
El altiplano chileno se ubica en el extremo oriental de Chile, meseta que supera los 3000 m.s.n.m., compartida con Argentina, Bolivia y Perú (Sarricolea & Romero, 2015). En Chile, pertenece administrativamente a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Posee una alta radiación solar, condicionada por factores geográficos –como su llana topografía – y climáticos, entre los cuales destacan su localización tropical, su elevación y su régimen de nubosidad (Aceituno, 1993). Posee grandes yacimientos cupríferos, entre otros recursos minerales, y registra problemas de escasez hídrica; cuyo período de acumulación de reservas y recarga de acuíferos, se presenta entre los meses de diciembre a marzo. Debido a la presión que la actividad antrópica – minera, agrícola y ganadera –, se ha visto aún más acentuada en los últimos 50 años, los problemas de escases hídrica. Las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta constituyen una unidad geomorfológica con rasgos macroestructurales semejantes. Presentan cambios transicionales del desierto, donde las pampas y las precordilleras se entrelazan, otorgando la condición de extrema aridez a la pampa central de norte grande, que corresponde al Desierto de Atacama pero que sólo es apreciable a menor escala, perteneciendo a la región Norte de las pampas desérticas y cordilleras prealtiplánicas, abarcando desde el límite Norte de Chile con Perú hasta el norte del río Elqui, en la región de Antofagasta. (Börgel O, 1984).

Esta región se encuentra bajo un régimen de clima tropical, con influencias anticiclónicas durante la mayor parte el año, salvo algunas excepciones cuando las masas húmedas del Amazonas alcanzan al altiplano y las cuencas superiores del río Lauca y Loa y la Cordillera de Domeyko, hacia el este, se extienden las planicies de altura correspondientes a las depresiones de Lauca, Loa Superior, la gran fosa Prealtiplánicas, la depresión de Atacama y de los salares cautivos, las que reciben los aportes de las lluvias de verano provocadas por la convección estival de masas de aire provenientes del interior del continente, y que logran sobrepasar, a través de los portezuelos, las enormes cordilleras. (Romero, 1985)

Su flora y fauna, se encuentra adaptada a las condiciones de oscilación térmica imperante con temperaturas altas en el día y bajas en la noche, y una altitud que va desde los 2.200 a 4.000 metros sobre el nivel del mar y poca precipitación correspondiendo a la ecorregión de la Puna, compartida con las naciones de Argentina, Bolivia y Perú. Mientras que, a medida que se descende en altitud la presencia del desierto marginal de altura y del desierto absoluto ejerce su predominio, siendo interrumpido sólo por la presencia de quebradas intermitentes, las que conforman oasis y vertientes. Llegando hacia la costa encontramos especies adaptadas a la escasez de aguas como cactáceas, las que se nutren de la camanchaca o neblina costera que les proporciona el vital elemento para poder subsistir.

Alberga ecosistemas prioritarios por su vulnerabilidad (MMA, 2011), como lo son los humedales Altoandinos ubicados sobre los 2.000 msnm de las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Estos humedales son la principal fuente de recarga de los acuíferos subterráneos, los cuales proveen de agua para el desarrollo de la ciudadanía y la industria en la región. También sustentan actividades productivas como el turismo de intereses especiales, la ganadería camélida, la agricultura y la minería. Además, el recurso hídrico permite el desarrollo la Fauna, Flora. Los valles y quebradas de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta favorecen la presencia de vegas, bofedales y humedales costeros pequeños, que también forman parte de estas áreas de conservación (áreas SNASPE, Parques, Reservas y Monumentos Nacionales)

Figura 1 Área de Estudio



1.4 Objetivos

Objetivo General

Analizar las tendencias climáticas actuales y sus proyecciones (en la precipitación y temperatura) en el norte grande y el altiplano chileno.

Objetivos Específicos

1. Elaborar una base de datos climática (1970-2013) para caracterizar y evaluar las tendencias de la precipitación y temperatura.
2. Identificar en qué medida las teleconexiones explican la precipitación estival en el norte grande, y con énfasis en el altiplano chileno.
3. Analizar los cambios climáticos derivados del peor escenario del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático para el 2080, en el norte grande y el altiplano, distinguiendo las áreas más afectadas.

1.5 Hipótesis

Las tendencias en temperatura y precipitación de los últimos 40 años deberían mostrar aumentos importantes de la temperatura (sobre todo en precordillera y altiplano) y una disminución de las precipitaciones, configurando áreas de mayor y menor sensibilidad al cambio climático, en el norte grande y altiplano andino chileno, lo cual debería ser consistente con lo proyectado al 2080.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO

2.1. El Cambio Climático y sus consecuencias en Sudamérica y Chile

De acuerdo a la Convención Marco sobre Cambio Climático CMCC (2002) se entiende por cambio climático, como el proceso de cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Complementando lo anterior, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas. Mientras que para autores como Alfaro & Amador (2009) el cambio climático es utilizado para caracterizar los cambios sistemáticos sostenidos en los promedios a largo plazo de los elementos o variables climáticas, donde *estas variaciones pueden deberse a mecanismos físicos de forzamiento externo como cambios en las emisiones de radiación solar o cambios en los parámetros orbitales así como también por procesos internos del sistema climático o a forzamientos de tipo antropogénico* (Alfaro & Amador, 2009).

De esta manera, y desde la publicación del primer informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en 1990, las actividades humanas sólo han contribuido al aumento de los gases de efecto invernadero, afectando no sólo la composición de la atmósfera; sino que también contaminando océanos, mares y depredando vastas áreas de bosques y selvas en todo el planeta.

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de hielo y nieve han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O y halocarbonos) han aumentado (IPCC, 2013). Así el cambio climático de carácter global no sólo afecta la temperatura del planeta sino que también la circulación de la atmósfera y por ende los regímenes de precipitación (Garreaud, 2011).

Del mismo modo, Javier Martín-Vide (2009) señala que para el sistema climático terrestre el cambio climático actual no constituye en sí una novedad en su larga historia. Avalado con investigaciones paleoclimáticas y geológicas, se demuestra que el planeta Tierra ya ha padecido cambios climáticos importantes y algunos de gran magnitud, con consecuencias devastadoras para el planeta, y de los cuales se ha sabido recuperar y regenerar. Pero a diferencia de los anteriores, el cambio climático que actualmente afecta al planeta no tiene una causa natural, sino que su causa es antrópica, siendo posible establecer que el cambio climático es el problema global de siglo XXI, siendo el principal reto ambiental para la humanidad (Martín-Vide, 2009).

Para conocer los posibles impactos que el cambio climático puede ocasionar en el futuro es que se generan proyecciones, las que se confeccionan empleando modelos climáticos globales (GCM), los que poseen distinta complejidad en consideración del número de subsistemas que los integran (usos de suelo, criosfera, océano, capas atmosféricas) y las escalas espaciales de salida. Los GCM simulan los cambios climáticos sobre la base de distintos escenarios a nivel mundial y regional. De ahí que, el IPCC en su Quinto Informe (2013) muestra cifras poco alentadoras sobre el devenir del planeta y sus futuros cambios. Así, es probable que para fines del siglo XXI la temperatura global sea superior en 1,5°C a la que existe actualmente, y esto se debe en gran parte a su incremento en un promedio 0,85°C en los últimos 100 años. Con respecto a las precipitaciones se acentuará el contraste que existe entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas.

Tabla 1 Fenómenos meteorológicos y climáticos extremos

Fenómenos	Probabilidad de Cambios Futuros	
	A principios del s. XXI	A finales del s. XXI
Días y noches fríos serán más cálidos y/o menos numerosos en la mayoría de las zonas continentales	Probable	Prácticamente seguro
Días y noches calurosos más cálidos y/o más frecuentes en la mayoría de las zonas continentales	Probable	Prácticamente seguro
Episodios cálidos/olas de calor. Mayor frecuencia y/o mayor duración en la mayoría de los continentes.	Evaluación no oficial	Muy Probable
Episodios de precipitación intensa. Mayor frecuencia, intensidad y/o cantidad de precipitación intensa	Probable en muchas regiones continentales	Muy probable en la mayoría de las masas terrestres de latitud media y en las regiones de latitud media.
Mayor intensidad y/o duración de la sequía	Nivel de confianza bajo (más probable que improbable)	Probable a escala regional y mundial.
Mayor intensidad y actividad de los ciclones tropicales	Nivel de confianza bajo (más probable que improbable)	Más probable que improbable en la zona occidental del Pacífico Norte y el Atlántico Norte.
Mayor incidencia de elevaciones y/o aumentos de los niveles del mar	Probable	Muy Probable

Fuente: Elaboración propia en base a la información entregada en (IPCC, 2013)

Se puede describir cuantitativamente mediante los siguientes términos: prácticamente seguro, probabilidad del 99-100%; sumamente probable, 95-100%; muy probable, 90-100%; probable, 66-100%; más probable que improbable, >50-100%; tan probable como improbable, 33-66%; improbable, 0-33%; muy improbable, 0-10%; sumamente improbable, 0-5%; y extraordinariamente improbable, 0-1%. Evaluación no oficial implica que no se ha podido calcular su probabilidad.

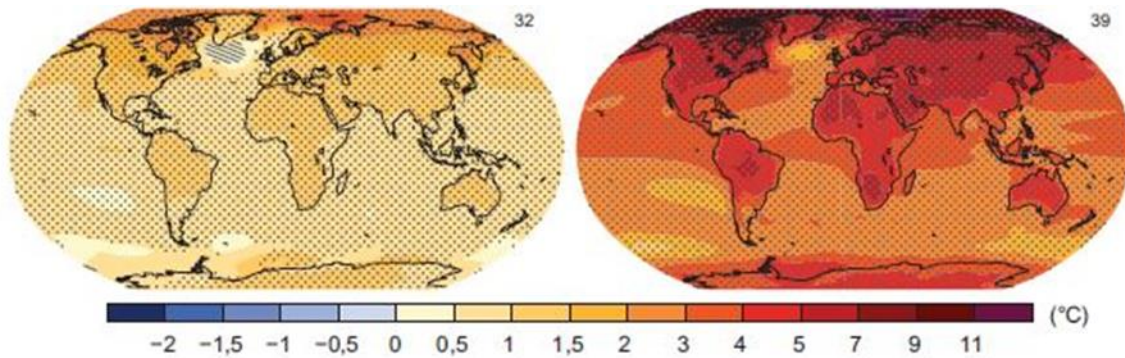


Figura 2 a. Cambio en la temperatura media en superficie 1986 - 2005 a 2081 - 2100. A la izquierda se muestra el RCP 2,6 mientras que a la derecha el RCP 8,5. Fuente: (IPCC, 2013)

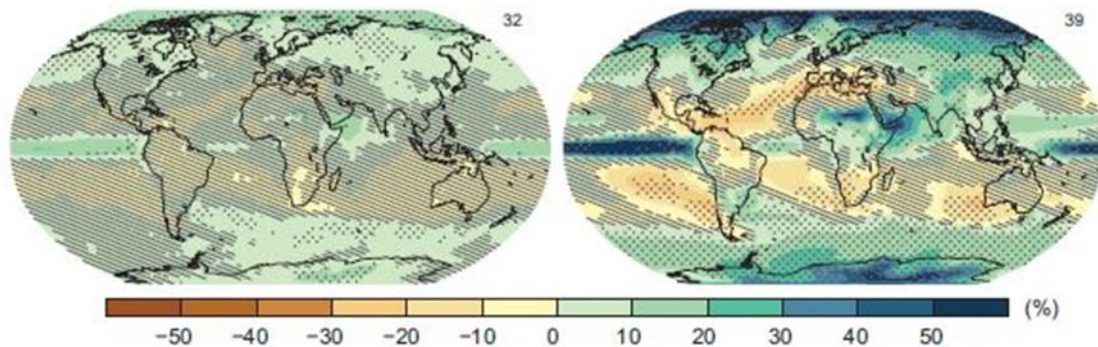


Figura 2b. Cambio en la precipitación media 1986 - 2005 a 2081 - 2100. A la izquierda se muestra el RCP 2,6 mientras que a la derecha el RCP 8,5. Fuente: (IPCC, 2013)

Ahora bien, los cambios climáticos sobre los que se posee mayor certeza, y derivados de los modelos, indican una disminución del contraste térmico entre los trópicos y latitudes subpolares, provocando consigo un debilitamiento y desplazamiento hacia los polos de los anticiclones subtropicales y cinturón de los Oestes, con la consiguiente reducción de la precipitación en las regiones subtropicales. (Rutllant, 1990).

Sudamérica posee una extensión zonal que va desde los 10°N hasta los 53°S. Sus tierras dan origen a diversos patrones de tiempo y exhibe climas con características tropicales, subtropicales y extratropicales. Superpuesta a las variaciones de norte a sur, existen importantes asimetrías de este a oeste a través del continente, forzadas por la presencia de los andes y las condiciones de contorno impuestas por el sudoeste frío del pacífico y cálido en el sureste del atlántico (Garreaud, *et al.*, 2009). De esta manera, las condiciones secas y relativamente frías predominan a lo largo del litoral del pacífico, mientras que las zonas húmedas y cálidas prevalecen en el interior del continente por la franja del atlántico. Ahora bien, con respecto a las condiciones climáticas de la zona central del continente, Garreaud *et al.* (2009) indica que las lluvias se presentan durante todo el año (en selva amazónica) pero que tienden a un máximo en el verano, debido principalmente a la presencia del Monzón Sudamericano. Con respecto a la circulación de los vientos y las masas de aire cargado de humedad, Kitoh *et al.* (2011) señalan datos importantes al respecto, haciendo referencia a que el aumento de las temperaturas podría provocar mayores flujos de humedad, teniendo temporadas de monzones bien marcadas como lo que sucede en la India. Todos estos datos, sugieren que en el futuro las zonas húmedas serán

mucho más húmedas que en la actualidad y las zonas secas se volverán más secas. (Kitoh, *et al.*, 2011)

El factor que condiciona la variabilidad térmica y pluviométrica de gran parte de Sudamérica es El Niño Oscilación del Sur (ENSO). Este incide sobre las precipitaciones, jugando un papel importante en variadas regiones de la cuenca del Pacífico. Los estudios de las anomalías en la precipitación relacionados con el ENSO indican que los episodios de El Niño se asocian con precipitaciones abundantes y mucha humedad en la parte Sudeste del continente y centro-sur de Chile; mientras que en el extremo norte del continente las precipitaciones son más bien bajas al igual que la humedad; mientras que para los eventos La Niña, las condiciones son opuestas a lo mencionado anteriormente (Garreaud, *et al.*, 2009), presentándose en ciclos de un año en promedio.

Así es posible, prever que las condiciones futuras de precipitación en Sudamérica tenderán a maximizarse durante el verano en la parte central, debido a la presencia de la temporada del moznón, lo que aportará vapor de agua de será transportado hacia el sur entregando lluvias en la zona de la cuenca de la Plata, en el río Paraná y parte del Altiplano Andino; y una disminución de éstas al Sur de Los Andes, más notoria en Chile central y a sotavento en la Patagonia; mientras que el invierno austral las lluvias tienden a concentrarse en el sur de Chile y al norte del Ecuador (Kitoh, *et al.*, 2011)

2.2. Variabilidad en el clima del Altiplano Chileno

El clima es definido tradicionalmente como el promedio de largo plazo de las variables meteorológicas (temperatura, precipitación, humedad, vientos, etc.) en una región; siendo determinado por la circulación atmosférica de gran escala y la geografía, los que definen los ecosistemas y los emprendimientos humanos que se desarrollan en una región. De esta manera, el clima está constituido por aquellos rasgos o elementos básicos del sistema climático que tienen una variación relativamente lenta en el tiempo y en el espacio (Alfaro & Amador, 2009).

De sus características más interesantes que el clima posee es su gran variabilidad, siendo ésta su única constante, haciendo clara referencia las oscilaciones naturales del sistema climático (Garduño, 1994). De esta manera, la variabilidad climática puede ser definida como las variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular (IPCC, 2013). Amador y Alfaro (2009) definen la variabilidad en términos temporales o espaciales, haciendo referencia la primera a la escala sinóptica (varios días) y la segunda a una clasificación climática por zonas. La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos (Montealegre & Pabon, 2000) que pueden verse afectados por señales de sistemas atmosféricos que inhiben o acentúan los patrones climáticos de una región.

La variabilidad climática suele darse cíclicamente y depende de factores relacionados con la estacionalidad, ondas que se presentan varias veces al año y fenómenos que suceden aproximadamente cada cierto número de años. La variabilidad climática es esperada y una vez ocurrida, el clima retorna a su condición normal, es decir, la variabilidad climática es una característica del clima, diferente al cambio climático, que una vez ocurrida, genera nuevas condiciones de variabilidad.

Con respecto a lo anterior, es necesario mencionar que dentro de las fluctuaciones temporales éstas se pueden clasificar de la siguiente manera:

Tabla 2 Escalas de variabilidad climática

Estacional	Intraestacional	Interanual	Interdecadal
Corresponde al Clima a nivel mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. La migración de la Zona de Convergencia intertropical (ZCIT), es considerada como una de las más importantes a escala estacional.	Hace referencia a las oscilaciones que determinan las condiciones de tiempo durante decenas de días o de uno o dos meses.	A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Un ejemplo típico de la variabilidad climática interanual corresponde a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño Oscilación del Sur.	En esta escala se manifiestan las fluctuaciones del clima a nivel de décadas.

Fuente: Elaboración propia en base a (Montealegre & Pabon, 2000)

Ahora bien el Altiplano Andino Chileno es un área climática que posee características de variabilidad condicionadas por su localización geográfica. Emplazada entre los 15°S y los 21°S, con una elevación promedio de 4000 m.s.n.m., se encuentra determinada por características climáticas únicas en el continente (Aceituno, 1993). En su condición tropical, por su ubicación sobre los 23°S, la variabilidad climática depende de los cambios en la circulación troposférica en las latitudes medias y altas (Rutllant, 1990), debido en gran parte al menor espesor de la columna atmosférica por su ubicación en la franja tropical (Aceituno, 1996).

Debido a su gran altitud y a los efectos topográficos propios de la zona altiplánica, unidos a la baja presión atmosférica (aproximadamente 620hPa a 4000 m.s.n.m.) y una baja densidad del aire, hacen de esta área andina una zona única. Destaca por ejemplo que su mínimo diario de presión atmosférica coincide con la hora de mayor calentamiento y expansión de la columna troposférica, el fuerte enfriamiento radiativo ocurrido en las noches da cuenta de una variación diaria y estacional de la amplitud del ciclo térmico, observándose el mayor contraste entre las condiciones diurna y nocturna durante los meses de invierno (Aceituno, 1996).

Otro aspecto importante a destacar dentro de la variabilidad climática en el Altiplano, es la circulación regional, destacando la circulación anticiclónica durante el verano, denominada Alta de Bolivia, el régimen de vientos locales –atribuidos a la topografía de la zona y a los procesos de advección de aire húmedo desde la cuenca amazónica, provenientes de la corriente en chorro subtropical que en el verano austral se desplaza hacia el Sur. (Aceituno, 1996).

Pero donde realmente se puede apreciar la variabilidad como una característica propia del clima, es en las precipitaciones. Las lluvias en el altiplano andino chileno se presentan de diciembre a marzo, como resultado de la intensa actividad convectiva de la región tropical del continente de la cual se hacen parte los andes centrales y que en verano alcanza su mayor intensidad y máximo desplazamiento al Sur (Aceituno, 1996). Estas lluvias alcanzan sus máximos en el borde occidental del Altiplano, superando el 90% del total anual, demostrando su naturaleza episódica. Las precipitaciones en el altiplano comienzan después del mediodía, asociadas a intensos chubascos caracterizados por nubosidad convectiva de fuerte desarrollo vertical y gran actividad eléctrica (Mendonça, 2013) tal y como se presenta en la figura 3. En el resto del año, cuando la actividad convectiva se ha desplazado hacia la región noroccidental del continente, los

eventos de precipitación son escasos y se asocian más bien a las perturbaciones frontales de origen extratropical, que se desplazan desde el Pacífico y que tienen un mayor impacto sobre el sector Sur occidental del Altiplano (Aceituno, 1996).

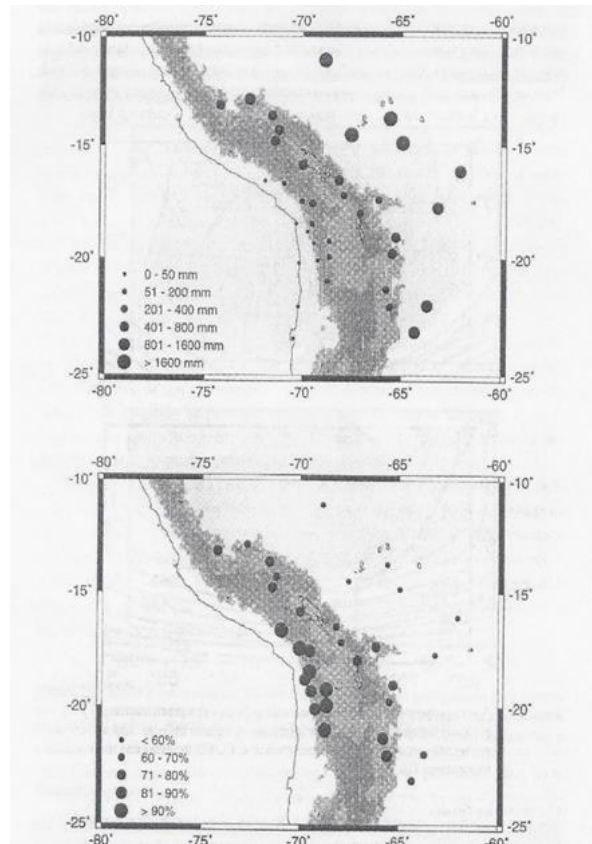


Figura 3 Precipitación en la región altiplánica en áreas adyacentes. En la imagen superior se muestra la precipitación anual; mientras que en el panel inferior ilustra la concentración porcentual de la precipitación anual en el período diciembre – marzo. Áreas en gris claro y oscuro identifican regiones con elevaciones por sobre 3000 y 4000 m.s.n.m. (Aceituno, 1996)

En cuanto a la periodicidad de las lluvias, estas muestran una considerable variabilidad interanual e interdecadal, pero una tendencia secular significativa. Además diversos estudios han establecido que durante los eventos El Niño o durante la fase negativa de la oscilación del sur, la precipitación en el Altiplano suele ser inferior a lo normal, mientras que en su fase positiva, las lluvias se ven incrementadas (Aceituno, 1996). En este sentido, se destaca al ENSO como uno de los factores causantes de la variabilidad climática en el altiplano, pero no es el único fenómeno atmosférico que condiciona el clima y la variabilidad climática en el altiplano.

2.3. Teleconexiones y su dominio en el clima del Norte Grande.

Se ha abordado el cambio y la variabilidad climática como una de las características más inherentes del sistema climático y teniendo en cuenta lo global de las relaciones entre los componentes de la atmósfera en las diferentes regiones del mundo, resulta evidente destacar que las conexiones en el subsistema atmosférico son las que dominan el clima a nivel global y determinan las temporadas de sequías y lluvias en buena parte del planeta.

Uno de estos fenómenos atmosféricos, las teleconexiones, son las responsables de modificar y establecer vínculos entre áreas distantes, alterando el clima del planeta, brindando la posibilidad de descubrir comportamientos sincrónicos entre los grandes centros de acción, anticiclones y depresiones, en escalas temporales que van desde meses a décadas.

Dentro de las definiciones más utilizadas para referirse al término de teleconexión figura la descrita por Javier Martín-Vide que las denomina como patrones de variabilidad de baja frecuencia (Martín-Vide, 2003). Otros autores como (Barry & Chorley, 1999) las definen como los vínculos existentes a grandes distancias de variables atmosféricas y oceánicas; vínculos entre condiciones climáticas, destacando que desempeñan un papel fundamental en el estudio de las interacciones aire-mar y procesos climáticos globales. Para Bridgman & Oliver (2006) las teleconexiones desempeñan un papel fundamental en el estudio de las interacciones aire-mar y procesos climáticos globales. A menudo constituyen la pieza que falta en el entendimiento de los patrones climáticos, tanto espaciales como temporales, que se producen a través de la mundo. La identificación de las conexiones sugerido por teleconexiones tiene llegado a ser tan importante que el estudio forma un subcampo de las ciencias de la atmósfera (Bridgman & Oliver, 2006).

Estos patrones de variabilidad de baja frecuencia lo conforman un dipolo constituido por un anticiclón y una depresión localizados sobre unas áreas determinadas, separadas por unos miles de kilómetros (Martín-Vide, 2003). Las células que componen el dipolo suelen presentar una “fase positiva”, o modo normal o más frecuente, en la que el anticiclón se muestra potente, al tiempo que la baja es profunda, en sus respectivas regiones de localización. Esto ocurre durante unos períodos medios o relativamente amplios de tiempo, entre unos meses y varios años. Cuando las células se debilitan o incluso se invierte su signo, apareciendo bajas presiones allí donde normalmente se localiza el anticiclón, y altas en la región habitual donde se centra la depresión, se habla de la “fase negativa”, menos duradera que la opuesta. Algunos de los mecanismos de conexión con otras regiones y subsistemas presentan una cierta inercia y desfase temporal, lo que permite adelantarse a sus efectos (Martín-Vide, 2003).

Este comportamiento atmosférico, presenta variaciones en escalas temporales, siendo posible apreciarlos como sub mensuales, intraestacionales (40 a 60 días), interanuales e interdecadales. Cualquier fenómeno que tiende a variar por encima o por debajo de un valor promedio en algún tipo de forma periódica se designa apropiadamente como una oscilación (Bridgman & Oliver, 2006).

Para el caso de Chile, las oscilaciones que afectan y condicionan el comportamiento climático del país son: la Oscilación del Sur (OS), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Antártica (AAO)¹ (Romero & Mendonça, 2011). La mayoría de estas oscilaciones están involucrados con la fuerza y la posición de los centros de acción, de altas y bajas presiones, y por otro lado, las temperaturas superficiales del mar (Bridgman & Oliver, 2006). A continuación se detallan las principales características de estas variabilidades de baja frecuencia y su comportamiento en fases negativas y positivas (Tabla 3).

¹ Si bien es cierto que la Oscilación Antártica (AAO) condiciona el clima de nuestro país, en esta investigación no será considerada.

Tabla 3 Patrones de variabilidad de baja frecuencia que afectan a Chile

Teleconexión	Descripción	Fase Positiva	Fase Negativa
Oscilación del Sur (SOI)	Consta de una anomalía de presión fuertemente anti-correlacionada sobre los océanos Índico y Pacífico Sur; tiene un período ligeramente variable, con un promedio de ocurrencia cada 2,33 años y, a menudo se analiza como parte de un evento ENOS (Bridgman & Oliver, 2006). Las variaciones del Índice de Oscilación del Sur, se calculan como la diferencia normalizada entre la presión atmosférica a nivel del mar registrada en las estaciones de Tahití y Darwin (Australia), que representan los bordes occidentales y orientales de la cuenca del Pacífico Sur (Romero & Mendonça, 2011).	<p><u>La Niña</u></p> <p>La circulación de Walker se intensifica con mayor fuerza y convección sobre los vientos alisios del Pacífico y del oeste.</p>	<p><u>El Niño</u></p> <p>Los vientos alisios se debilitan o incluso pueden revertirse, permitiendo que el área de agua más cálida que lo normal se mueva a la zona tropical del océano Pacífico central y oriental.</p>
Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)	Fenómeno de larga vida, definido por las temperaturas oceánicas superficiales, en el noreste y oeste del océano Pacífico (Bridgman & Oliver, 2006). Su ocurrencia persiste en ciclos que van de los 20 a 30 años. (Romero & Mendonça, 2011).	La fase cálida se caracteriza por las anomalías de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico de NW (o SW en el Pacífico Sur) presentando aguas más cálidas y vientos alisios debilitados, se asocia a El Niño.	La fase fría se caracteriza por temperatura fría de las aguas y los vientos alisios intensos, se asocia a La Niña.

Fuente: Elaboración Propia en base a Bridgman & Oliver (2006) y Quintana & Aceituno (2008)

2.3.1. El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

El Niño Oscilación del Sur (ENSO) es un fenómeno global de interacción océano-atmosférico en la cuenca central del Pacífico, manifestado por la alternancia de los eventos “El Niño” y “La Niña” (Díaz & Markgraf., 2000). El término “El Niño” se refiere al fenómeno océano-atmósfera del clima a gran escala vinculada a un calentamiento periódico de las temperaturas de la superficie marina a través del centro y el centro oriental del pacífico. El ENSO está arraigado en el sistema océano-atmósfera en el Pacífico tropical (Aceituno & Montecinos, 1993), y por lo tanto tiene un efecto fuerte y directo sobre la costa de Ecuador, Perú y norte de Chile, así como un efecto indirecto (a través de teleconexiones atmosféricas) durante gran parte de Sudamérica subtropical que se extiende también a las altas latitudes. Representa uno de los mejores ejemplos de teleconexión ya que presenta mayor afectación, es un fenómeno natural, recurrente pero sin no tiene una periodicidad fija, expresa la íntima relación entre las componentes del sistema climático (océano - atmosfera), un modelo global de variabilidad climática, no siendo causa ni consecuencia del cambio climático (aunque estará influido por este y a su vez influirá en él) y no constituyendo el origen de todas las catástrofes climáticas (Martín-Vide, 2003) (Ver figura 4).

El ciclo ENSO consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiesta principalmente a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la temperatura Superficial del Mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental; desarrollándose el ciclo de manera aperiódica y una escala de tiempo mayor que la corriente de El Niño, presentándose a intervalos irregulares que oscilan entre los 3 a 7 años (Maturana, et al., 2004).

La componente oceánica del ciclo ENSO está caracterizada por la aparición de fuertes Anomalías positivas (durante el niño) o negativas (durante la niña) de la Temperatura Superficial del Mar (ATSM) en regiones específicas de la cuenca del pacífico y la costa sudamericana, las que se prolongan por varios meses consecutivos. Las anomalías positivas de TSM se asocian al hundimiento de la termoclina y a la reducción de la surgencia costera; mientras que las anomalías negativas de TSM se asocian a la elevación de la termoclina y fortalecimiento de la surgencia (Díaz & Markgraf., 2000).

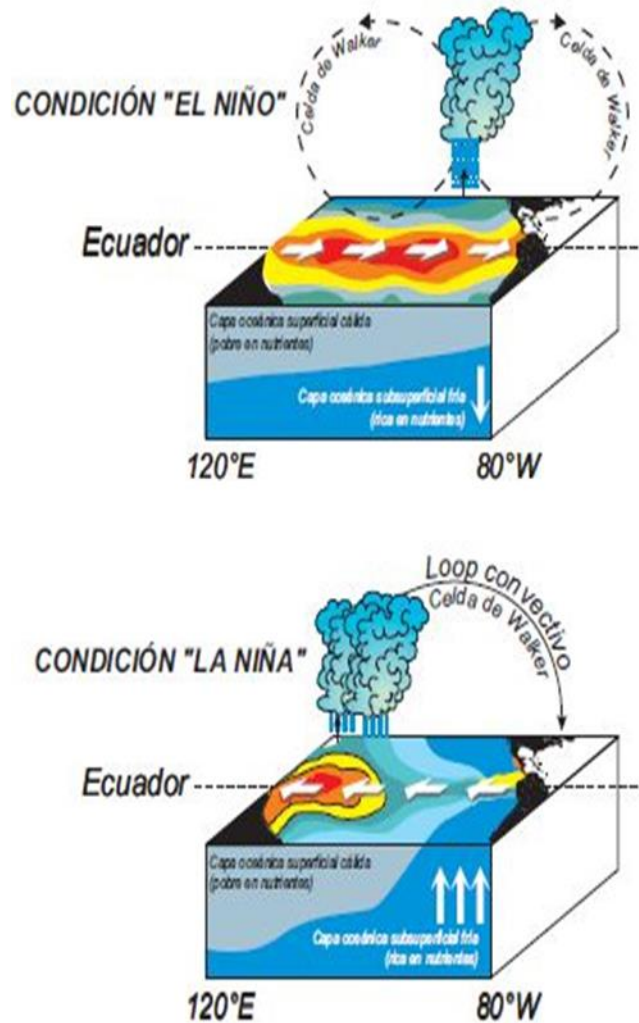


Figura 4. Esquema Condición El Niño versus La Niña Modelo de convección, temperatura del mar y surgencia, bajo condiciones de El Niño y La Niña. (Maturana, et al., 2004)

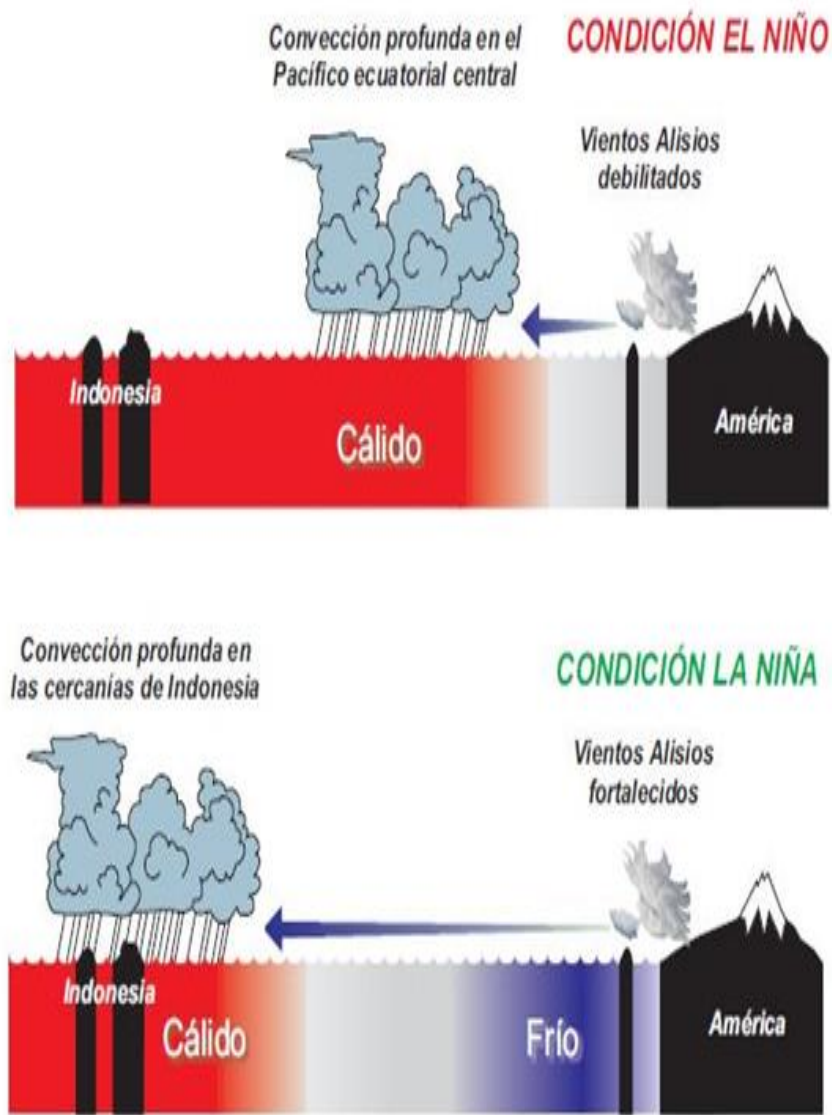
La componente atmosférica del ENSO, está asociada con una fluctuación interanual cuasi-sincrónica de dos sistemas de presión a gran escala: el sistema de baja presión atmosférica superficial, ubicado sobre el sector oeste del océano pacífico ecuatorial, y el sistema de alta presión atmosférica superficial (anticiclón), ubicado en los subtrópicos orientales del océano Pacífico Sur, respectivamente. Para su cálculo se utiliza el Índice de la Oscilación del Sur (SOI) el que se define como la diferencia de la presión atmosférica media mensual entre la región de alta presión (Tahití) y de baja presión (Darwin), existiendo dos fases: una negativa (SOI negativo) caracterizado por el descenso de la presión atmosférica superficial en el sector oriental del océano Pacífico (El Niño), y otra positiva (SOI positivo), donde la presión atmosférica superficial aumento en el mismo sector (La Niña) (Maturana, et al., 2004). A continuación se detallan algunos de los efectos más comunes durante las fases cálidas y frías del ENSO (Tabla 4).

Tabla 4. Principales características de las fases frías y cálidas del ENSO

Fase del Ciclo	Vientos Alisios	Presión Atmosférica	Precipitaciones
Fase Cálida	Después de confluir en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) los vientos se dirigen al este en América del Sur y al oeste en Indonesia. Durante los evento Niño, se produce un cambio en su intensidad y se debilitan en el oeste y centro del pacífico, invirtiendo completamente su dirección, soplando de oeste a este. Este debilitamiento genera una disminución en la surgencia ecuatorial, la que facilita la aparición de anomalías positivas en la TSM.	Se produce cuando el SOI es negativo, los valores de la presión atmosférica son relativamente más altos que la media normalizada sobre Indonesia y Australia (Darwin), y más bajos que la media normalizada sobre la polinesia francesa (Tahití), motivo por el cual se produce una modificación en la circulación de la célula de Walker, lo que genera episodios de alta convección.	Durante el desarrollo de la fase cálida del ciclo ENSO, con el debilitamiento de los vientos alisios y el traslado de las masas de aguas más cálidas desde el oeste hacia el centro y este del Pacífico; la convección atmosférica asociada junto a la evolución de la temperatura del mar, modifican la circulación de la célula de Walker sobre el Ecuador, desencadenándose episodios de precipitaciones intensas.
Fase Fría	En presencia de La Niña, los vientos que soplan normalmente hacia el oeste a lo largo del Pacífico tropical, se intensifican, favoreciendo el ascenso de las aguas más profundas y frías. Como consecuencia de esto, disminuye la profundidad de la termoclina y se observa la presencia de anomalías negativas en la TSM y el nivel del Mar.	Durante la fase fría del ciclo ENSO, la presión atmosférica es más baja que lo normal sobre el sector de Indonesia y el norte de Australia, y más alta que lo normal sobre el pacífico tropical del este. Esto explica la intensificación de los vientos Alisios que soplan hacia el este cercanos al pacífico ecuatorial Corresponden a valores positivos en el SOI.	A consecuencia del enfriamiento de las aguas en la banda central del océano pacífico ecuatorial, se presentan anomalías en la circulación atmosférica tropical, las que se manifiestan al lado este del pacífico. Se observan condiciones atmosféricas más secas de lo normal.

Fuente: Elaboración Propia en base a lo expuesto por (Maturana, et al., 2004)

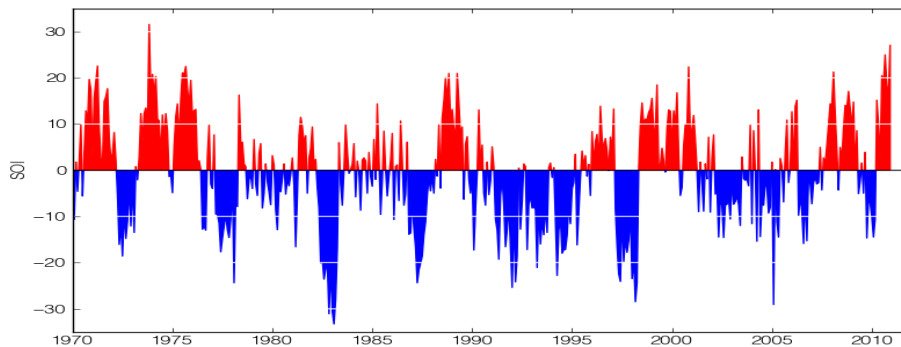
Figura 5. Modelo de viento, precipitación y temperatura del mar en las fases ENSO



Índice Oscilación del Sur (SOI)

Índice utilizado para medir la ocurrencia y fuerza del ENSO comparando condiciones meteorológicas en dos áreas tropicales del Océano Pacífico. El SOI es calculado como la diferencia entre la presión atmosférica mensualmente estandarizada entre Tahití y Darwin. Períodos con valores negativos corresponden a la fase Niño, mientras que valores positivos corresponden a la fase Niña. (Muruá, *et al.*, 2003). En la figura 6, se aprecia en colores rojo y azul, las fases cálidas y frías del índice oscilación del Sur, mostrando los períodos con eventos ENSO más fuertes en los últimos 40 años.

Figura 6. Índice Oscilación del Sur desde 1970 a 2010.

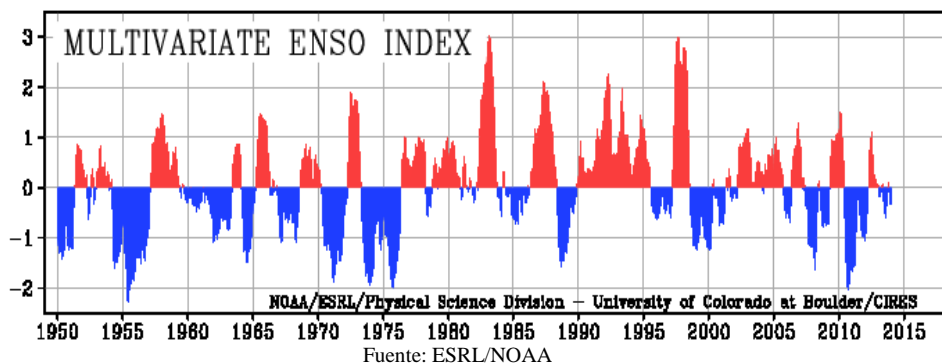


Índice ENSO Multivariado (MEI)

Índice que monitorea las variables observables sobre el Pacífico Tropical: Presión del nivel del mar, circulación zonal y meridional, componentes del viento en la superficie del mar, la temperatura del aire en superficie y la fracción total de la nubosidad del cielo.

El MEI se calcula por separado y modo bi-mensual, lo que permite proveer una descripción completa y flexible del fenómeno ENSO, a diferencia de los valores que entrega otros índices, como el SOI, aunque comparten los mismos valores tanto negativos asociados a fases frías o La Niña, y valores positivos asociados a fases cálidos o El Niño. (Ver figura 7)

Figura 7. Índice ENSO multivariado 1950 - 2015



Fuente: ESRL/NOAA

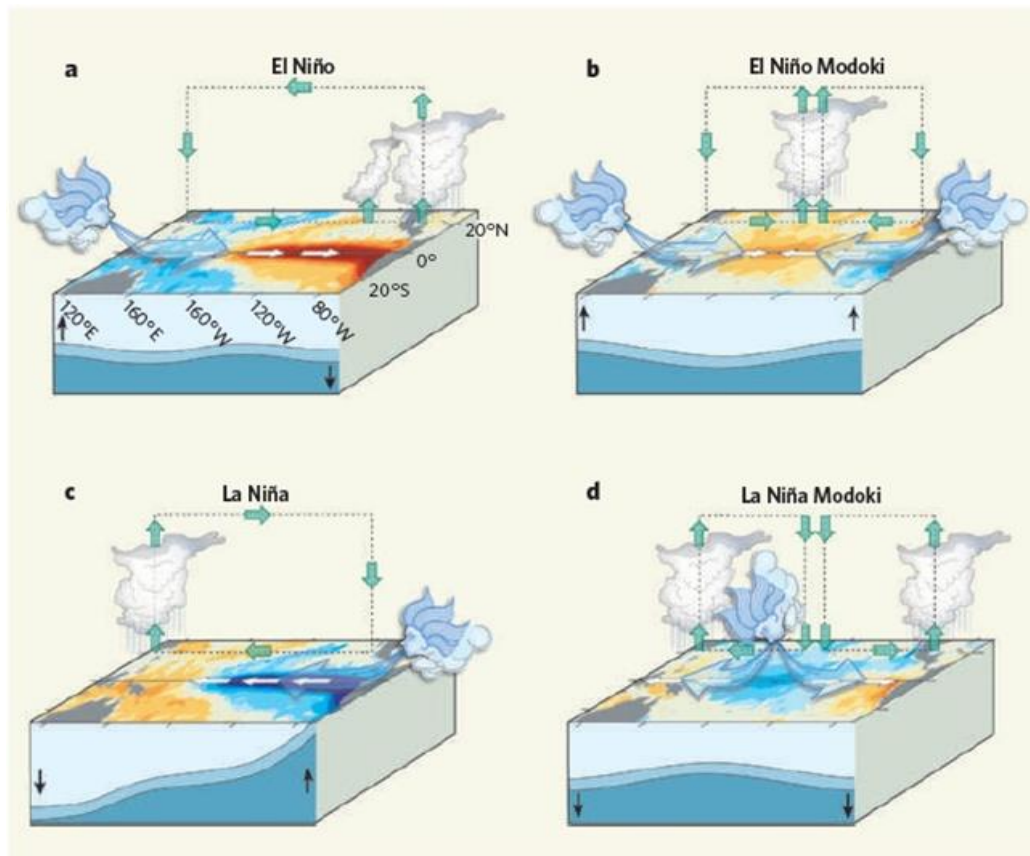
ENSO MODOKI

La terminología ENSO MODOKI es relativamente reciente dentro del estudio de las teleconexiones. Este fenómeno acoplado entre océano – atmósfera tiene su área de influencia en el Pacífico Tropical. Su principal diferencia con El Niño convencional, es el calentamiento anómalo situado en el pacífico tropical central y un enfriamiento en el pacífico tropical oriental y occidental.

El 2004 fue un año peculiar en el pacífico, donde las temperaturas superficiales del Mar se dieron de manera diferente a los patrones vistos y estudiados con fenómenos ENSO anteriores. Debido a estas anomalías, investigadores como Yeh *et.al* 2009 y Yamagata *et al.* 2007, tomaron las bases de datos observados para el período 1979 – 2005, y se encontraron con eventos ENSO con características similares a las presentadas el año 2004. De esta manera, este calentamiento anómalo y único en el pacífico central ecuatorial está asociado a este patrón de enfriamiento y calentamiento, las teleconexiones son muy diferentes a los patrones de teleconexión conocidas con El Niño convencional (Ashok & Yamagata, 2009).

Es así, como el concepto El Niño Modoki su significado en Japonés es similar, pero a la vez diferente, se caracteriza por un calentamiento anormal de la zona ecuatorial central del Pacífico flanqueado por regiones anormalmente frías tanto al oeste como al este. Tales gradientes de TSM zonales resultan en dos células de Walker anómalas en circulación sobre el pacífico tropical y una región húmeda, en el pacífico central. Este fenómeno aparece como el segundo en dominar la variabilidad interanual en el pacífico tropical (Yamagata, *et al.*, 2007).

Figura 8. Diferencias entre El Niño y El Niño Modoki



Fuente: (Ashok & Yamagata, 2009)

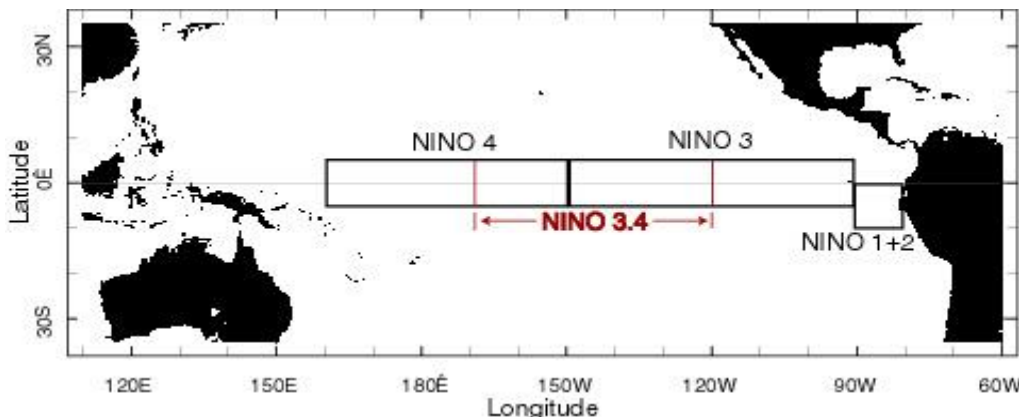
- A. En líneas generales, se produce el fenómeno de El Niño cuando los vientos del Este se debilitan; y en el Oeste prevalecen. Esta condición se clasifica por temperaturas más cálidas de lo normal en la superficie del mar (TSM) en el este del océano, y se asocia con alteraciones en la termoclina y en la circulación atmosférica, que hacen que el aire húmedo esté al este y el aire seco al oeste.
- B. En un episodio de El Niño Modoki se produce una condición anómala muy diferente a la de El Niño. Las TSM más cálidos ocurren en el pacífico central, y es flanqueado por aguas más frías del este y del oeste y están asociados con distintos patrones de convecciones atmosférica.
- C. Y D. son las fases negativas La Niña y La Niña Modoki. Yeh et al 2007 argumenta que la frecuencia cada vez mayor del ENSO MODOKI se debe entre otras cosas al calentamiento antropogénico, y que estos eventos en el pacífico central se producirá con mayor frecuencia si el calentamiento global aumenta.

El Niño 3.4

El Niño 3.4 es uno de varios indicadores de El Niño Oscilación del sur, basado en las temperaturas superficiales del mar. El Niño 3.4 es la anomalía de la temperatura media de la superficie del mar en la región delimitada entre la 5 ° latitud norte y el 5 ° latitud sur; 170 ° a 120 ° longitud oeste. Esta región tiene una gran variabilidad en escalas de tiempo en El Niño, y está cerca de la región en la que los cambios en la temperatura de la superficie marina local son importantes para el desplazamiento de la gran región de las lluvias que normalmente se encuentran en el extremo oeste del pacífico. (Ver figura 9)

Un episodio de El Niño o la Niña se identifica si durante el rodaje de cinco meses los valores de la zona 3.4 exceden + 0.4 durante El Niño y -0.4 durante La Niña, al menos durante 6 meses consecutivos.

Figura 9. Zonas del ENSO en el Océano Pacífico



Fuente: (IRI - International Research Institute for Climate and Society.)

2.3.2. Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), es un patrón de variabilidad de temperatura en el Océano Pacífico que está aproximadamente 20 a 30 años en fase fría o en fase cálida. La fase fría de la PDO está asociada con La Niña, en cuanto a la temperatura fría de las aguas y los vientos alisios intensos, mientras que la fase cálida de la PDO va asociada a El Niño, con aguas más cálidas y vientos alisios debilitados (Quintana & Aceituno, 2008) (Ver figura 10)

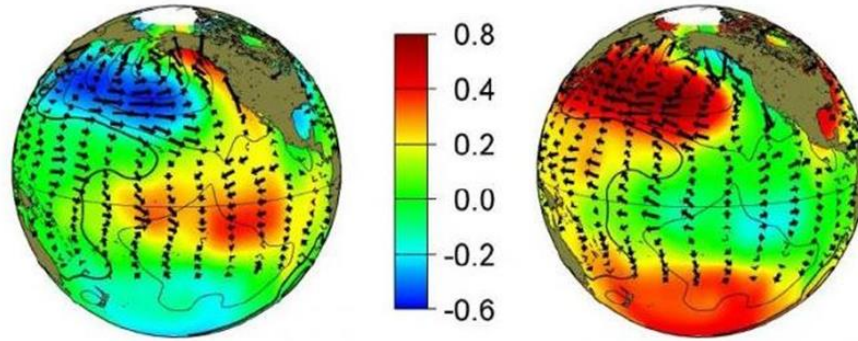


Figura 10. Condiciones típicas en el océano Pacífico durante las fases positiva (izquierda) y negativas (derecha) de la PDO.

Los colores muestran las anomalías de la temperatura (°C) y las flechas la dirección de los vientos dominantes, la cual se invierte entre ambas fases. (Jiménez, 2010)

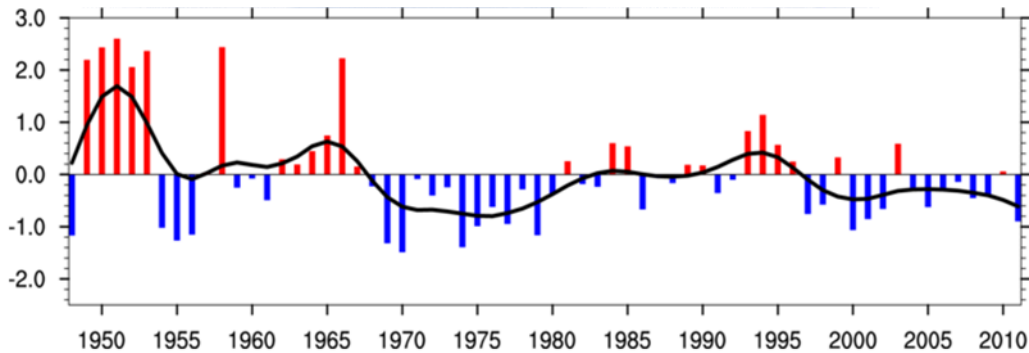
Para América del Sur, los datos de precipitaciones exhiben una variabilidad decadal e Interdecadal, sin embargo, su amplitud es menor que los cambios anuales. De esta manera, la PDO aparece como uno de los fenómenos más estimables para explicar dicha variabilidad.

La PDO es frecuentemente asociada al ENSO, dado que sus efectos climáticos espaciales de fases cálidas y frías presentan una correlación con aquellas fases de El Niño y La Niña. (Garreaud, et al., 2008). Se entiende entonces, según lo expuesto por Garreaud *et al.* (2008), que la PDO actúa como modelador de baja frecuencia de la variabilidad asociada al ENSO causando una “interferencia constructiva” (Andreoli & Kayano, 2005) dado que las anomalías pluviométricas El Niño/La Niña tienden a ser más fuertes en aquellos episodios que ocurren durante la fase cálida/fría de la PDO. De esta manera, la PDO y el ENSO pueden tener efectos combinados sobre las anomalías en la distribución de la precipitación en algunas regiones, actuando de forma constructiva (anomalías fuertes y bien definidas) cuando se encuentran en la misma fase y de forma destructiva (anomalías débiles y no definidas) cuando se hallan en fases opuestas (Andreoli & Kayano, 2005)

2.3.3. Índice Monzón Sudamericano

El índice monzón de verano sudamericano (*South American Summer Monsoon Index SASMI*) es definido como un área promediada estacionalmente (DJFM) y la estacionalidad normalizado dinámico (DNS) en 925 hPa en el dominio del monzón sudamericano ($17,5^{\circ}$ - 10° S , 50° - 62.5° W) (Li & Zeng, 2005)

Figura 11. Índice Monzón de América del Sur (1948 - 2012)



The normalized time series of SASMI (1948-2012).

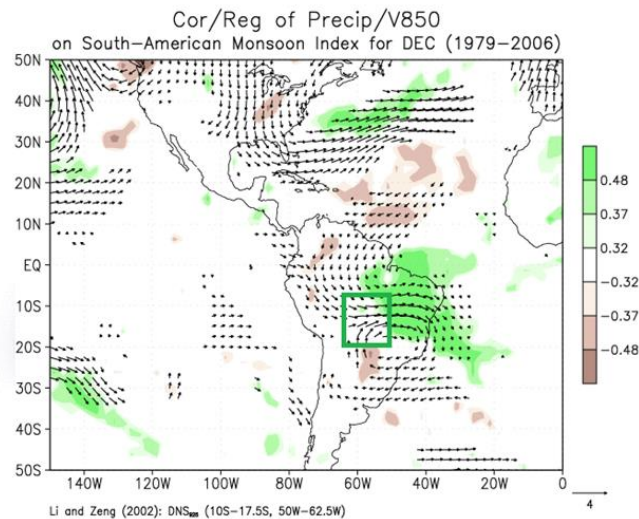
Fuente: <http://ljp.gcess.cn/dct/page/65581>

Como lo explican Zhou y Lau en su investigación del año 1998, el Monzón Sudamericano se produce por la existencia de un régimen de circulación del monzón de verano regional inducida por el fuerte calentamiento diabático sobre el altiplano sudamericano subtropical centrado en la meseta del altiplano.

Así en su estudio de caso del Monzón de verano Sudamericano (SASM), reveló las siguientes características:

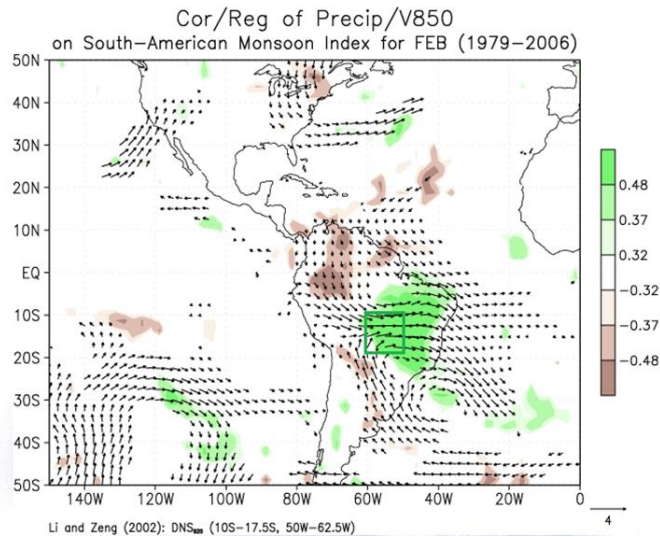
- 1) En el final de la primavera, el inicio de SASM es señalado por una fusión brusca de los chorros del oeste dobles superiores de la troposfera, una en los subtrópicos y el otro en la región subpolar, en un solo chorro en las latitudes medias. Esto es seguido por el establecimiento de un vórtice al sureste del altiplano y la ocurrencia de fuertes precipitaciones sobre subtropical de Brasil. (Figura 12)

Figura 12. Monzón sudamericano en el mes de Diciembre



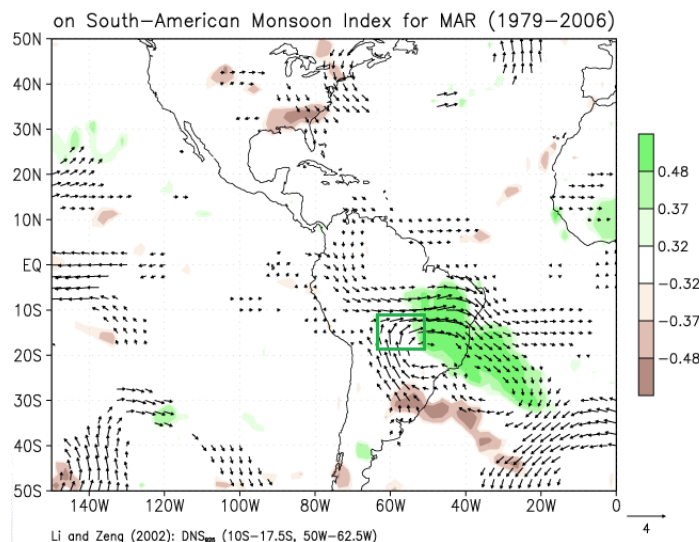
- 2) Durante la fase madura de SASM, la zona de fuertes lluvias se mueve sobre la meseta del altiplano y las tierras altas al sur de Brasil. Las características SASM plenamente establecidos son los siguientes: (a) un aumento de los vientos alisios ecuatoriales del atlántico norte, que emana de la alta Sahara y cruza el ecuador en el continente sudamericano; (b) una acumulación de fuertes vientos del norte lo largo del lado este de los andes tropicales; y (c) el desarrollo de la zona de convergencia del atlántico sur en la posición más al Sur con fuerte actividad convectiva. Mientras tanto, el flujo de retorno superior de la troposfera se desprende de un anticiclón formado sobre la meseta del altiplano, cruza el ecuador, y se hunde sobre el noroeste de África. (Figura 13)

Figura 13. Monzón sudamericano en el mes de febrero



- 3) La retirada de SASM a finales del verano es señalado por el hendida nuevamente del chorro del oeste de latitudes medias. Al mismo tiempo, el flujo del monzón del noroeste de bajo nivel disminuye, reduciendo el suministro de humedad y que conduce a la terminación de fuertes precipitaciones sobre las tierras altas subtropicales. (Figura 14)

Figura 14. Monzón sudamericano en el mes de Marzo



Los resultados también muestran que las características antes mencionadas de SASM están claramente vinculadas a los cambios de temperatura de la troposfera sobre el altiplano sudamericano central. Sensible frente calor latente sobre el altiplano están obligados a desempeñar un papel importante en la evolución de SASM.

Para proporcionar un mayor apoyo de la presencia de un clima monzónico sobre América del Sur, SASM se compara y contrasta con la " monzón de verano asiático al Este "clásico" (EASM). Muchas de las características similares, incluyendo la evolución entre los dos sistemas, se han identificado. También se discuten aspectos contrastantes del SASM del EASM. Se señala que una serie de características monzónicas del clima de América del Sur, tales como la inversión estacional del viento a poca altura, llega a ser evidente sólo cuando se retira el fuerte viento media anual. Sobre la base de los rasgos característicos y su evolución, los autores concluyen que un clima monzónico existe sobre América del Sur. (Zhou & Lau, 1998)

2.4. Escenarios climáticos y variables de análisis de cambios climáticos

La comprensión del sistema climático es un problema de gran interés científico. Los adelantos en el conocimiento de las interacciones entre la atmósfera, los océanos, la biosfera, la criosfera y la superficie terrestre están revolucionando las ciencias de la Tierra. Además, en estos últimos años, una sensación de urgencia viene alimentando la investigación sobre la modelización del sistema climático.

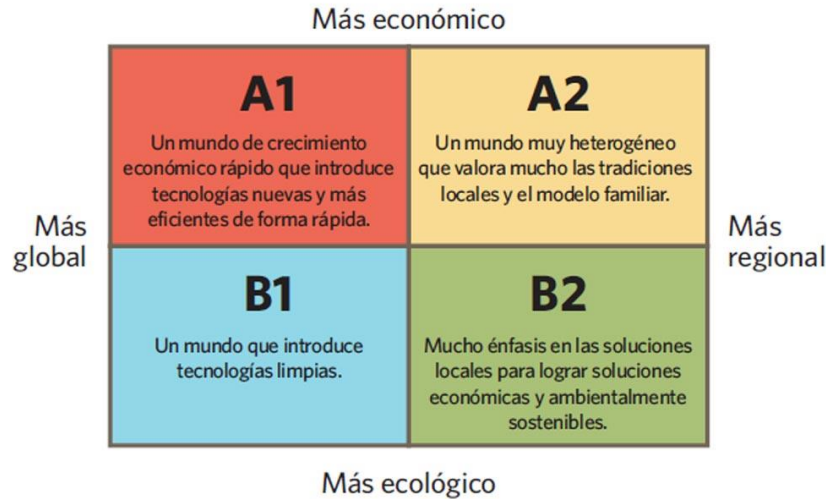
La probabilidad que las actividades humanas alteren la composición de la atmósfera; afecten el clima a nivel regional y mundial, y repercutan en las economías de los países y en los ecosistemas naturales, ha estimulado el desarrollo de modelos climáticos que entreguen escenarios futuros con los posibles daños, que como especie, estamos causando al medioambiente.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en el año 1997 estableció que las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de sistemas dinámicos que son determinados por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. De esta manera, aparecen los escenarios climáticos como imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. (Houghton, et al., 1997).

De esta forma, el concepto de escenario climático se utiliza para denotar un estado probable o plausible, normalmente simplificado, del sistema climático ante uno o más diferentes tipos de forzamientos (Alfaro & Amador, 2009). Dichos escenarios están contruidos en base a un conjunto de variables físicas y estadísticas las que unidas permiten identificar e investigar las posibles consecuencias del cambio en el clima de un área determinada. Así un escenario de cambio es simplemente la diferencia entre un escenario climático y el clima actual. (Alfaro & Amador, 2009).

Los escenarios abarcan un gran número de fuerzas determinantes como las demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las de emisiones de GEI y de dióxido de azufre. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una "familia" de escenarios (Houghton, et al., 1997), como se explican en la figura 15.

Figura 15. Escenarios Climáticos y Familias



La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Esta imagen muestra la dirección de los acontecimientos futuros en base a las cuatro líneas evolutivas, las que difieren con un grado de irreversibilidad creciente. (Fuente: IPCC 2000)

2.4.1. Escenarios Futuros

En su más reciente publicación, el IPCC 2013 (AR5) generó diversos escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP), los que incorporan los forzamientos radiativos², expresados en watts por metro cuadrado para el año 2100, comparados con los valores anteriores a la era industrial.

Estas compilaciones corresponden a una adecuación y mejora de los escenarios presentados en la penúltima publicación del IPCC (AR4) recogiendo la idea central y narrativa de estos, englobando sus principales características y centrándose en la respuesta del sistema climático; más que en las medidas que se toman o como se llegó a dicho escenario (WMO, 2014)

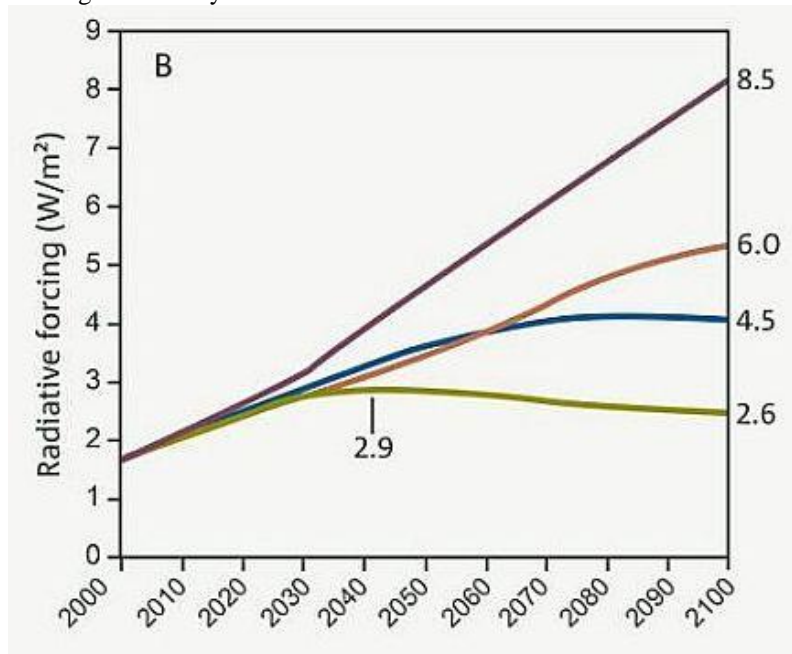
Para lograr una ejemplificación total de los efectos que las emisiones de los GEI al sistema climático es que se replantearon y mejoraron los escenarios del AR4, quedando ordenados de menor a mayor severidad, de la siguiente manera:

- Escenario **RCP 2,6**, fue desarrollado por el equipo de modelamiento IMAGINE, de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos. Esta curva engloba los escenarios que llevan a bajas concentraciones de gases de efecto invernadero. Se caracteriza por alcanzar un peak de 3,1 W/m² a mediados de siglo, para luego descender y estabilizarse en 2,6 W/m² a finales de siglo.
- Escenario **RCP 4,5** es desarrollado por el equipo de modelamiento MiniCAM, del Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI). Esta curva de forzamiento plantea un aumento de las emisiones sin sobrepasar los 4,5 W/m², estabilizándose en este valor a finales de siglo.
- Escenario **RCP 6,0** es desarrollado por el equipo de modelamiento AIM, del Instituto Nacional para Estudios Ambientales de Japón (NIES). Esta curva de forzamiento plantea un aumento de las emisiones sin sobrepasar los 6 W/m², estabilizándose en este valor a finales de siglo.
- Escenario **RCP 8,5** es desarrollado por el equipo MESSAGE y por el Marco de Evaluación Integrada IIASA, del Instituto Internacional para la Aplicación de Sistemas de Análisis (IIASA) en Austria. Se caracteriza por un aumento que alcanza los 8,6 W/m² hacia el año 2100, sin llegar a una estabilización visible.

Cada uno de estos escenarios es un conjunto de proyecciones de los elementos que componen un forzamiento radiativo, sirviendo como input para los modelamientos atmosféricos. Por lo tanto, estos escenarios carecen de carácter predictivo con respecto a las variaciones en usos de suelo, emisiones, o el cambio climático en sí. Tampoco son prescripciones sobre políticas adoptadas o por adoptar, y solo tienen el valor científico de simular el nivel de forzamiento energético del sistema. Por lo tanto, no representan un futuro específico con respecto a las políticas climáticas adoptadas (o no adoptadas), o viabilidades tecnológicas, económicas o políticas (WMO, 2014)

² El forzamiento radiativo hace referencia a la presencia de una perturbación al balance radiativo del sistema climático de la Tierra. Esta variación ha originado una absorción general de energía por parte del sistema climático, lo que genera la perturbación ya nombrada. La principal causa de este forzamiento se debe al aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, el que se viene produciendo desde el comienzo de la era Industrial. (IPCC, 2013)

Figura 16. Proyección de escenarios de forzamiento radiativo



Fuente: Climate Change in Australia Technical Report

2.4.2. Modelos de Circulación General (GCM) y Atmosfera-oceánicos MCGAO)

Los modelos numéricos son herramientas fundamentales en la investigación del clima (WMO 2012). Van desde modelos muy detallados de un determinado proceso, a través de los modelos climáticos o sistema tierra mundiales y regionales complejos, a modelos de sistema climático más idealizadas. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo los estudios de los procesos, la asimilación de datos y análisis, atribución de simulación histórica y paleoclima, predicción estacional a interanual del clima, las proyecciones climáticas futuras, y la reducción de escala regional. Además, los servicios climáticos y la información relacionada utilizados para fines sociales y políticas se basan en gran medida en la salida de este tipo de modelos.

Los modelos informáticos del cambio climático más generales que utiliza el IPCC son los Modelos de Circulación General (CGM), que resuelven las ecuaciones de la atmósfera y los océanos mediante el desglose de sus dominios en rejillas volumétricas, o cajas, a cada una de las cuales se le asigna un valor promedio para propiedades como velocidad, temperatura, humedad (de la atmósfera) y salinidad (de los océanos). El tamaño de la caja es la resolución espacial del modelo, cuan más pequeña es la caja, más alta es la resolución (Houghton, et al., 1997). Definir qué modelo es más adecuado para un área en particular dependerá de las variables a tomar y de los diferentes usos que se les quiera dar. Para esto la tabla 5 muestra las diferencias entre los modelos simples y los complejos.

Tabla 5. Comparación entre Modelos Climáticos Simples y Complejos

Modelos Climáticos Simples	Modelos Climáticos Complejos
<p>Por lo general, producen resultados integrados zonal o mundialmente, y sólo para la temperatura y los cambios de temperatura, y no para otras variables, como la lluvia.</p>	<p>Simulan la variación geográfica pasada y presente de la temperatura, y otras variables de interés climático, como la lluvia, evaporación, humedad del suelo, nubosidad y vientos, y proporcionan cambios creíbles a escala continental de al menos algunas de esas variables.</p>
<p>No pueden simular los posibles cambios de la variabilidad climática, pues la salida consiste únicamente en la señal de cambio.</p>	<p>Tienen el potencial de simular cambios de modalidad importantes de la variabilidad interanual (por ejemplo: El Niño), y también de valores medios.</p>
<p>Hay que especificar la sensibilidad climática y otras propiedades de los subsistemas utilizando los resultados de los modelos complejos o las observaciones. Dichas propiedades se pueden alterar fácilmente a efectos de las pruebas de sensibilidad.</p>	<p>La sensibilidad climática y otras propiedades de los subsistemas se calculan mediante una combinación de leyes físicas y parametrizaciones de modelo a escala de subrejilla o pixel.</p>
<p>Son útiles para los estudios de sensibilidad que engloban la interacción de componentes del sistema climático de gran escala.</p>	<p>Son útiles para estudiar los procesos físicos que el modelo puede resolver.</p>

La mayor parte de los estudios de adaptación basados en escenarios de clima futuro derivados directa o indirectamente de los Modelos de Circulación General Atmosféricos y Oceánicos (MCGAO) son generalmente realizados en una de las siguientes tres escalas: 1.- Simulaciones globales llevadas a cabo usando bases de datos climáticos interpolados a una resolución de 0.5° x 0.5° o mayor, 2.- análisis regionales utilizando rejillas o mallas de más alta resolución donde los datos climáticos han sido reducidos de escala o ajustados a una escala requerida (“downscaling”) con base en los resultados de los MCGAO o 3.- estudios locales donde los resultados de los modelos y datos climáticos observados son interpolados de alguna manera a las coordenadas de algún sitio de interés (Price, *et al.*, 2001).

Pero estos modelos a nivel macro no responden a todos los escenarios de cambios posibles. Para lograr dar respuesta a los requerimientos a escalas menores, se utiliza el método de ajuste dinámico el que consiste en un procedimiento donde se utiliza un modelo de área limitada de alta resolución (Modelo Climático Regional – MCR) con condiciones de frontera como función del tiempo derivadas de los MCGAO (Alfaro & Amador, 2009). Este tipo de modelo más acotado, ha demostrado que simulan mejor el clima y la meteorología regional que los MCGAO, en especial sobre regiones montañosas, áreas a la que corresponde el altiplano chileno, siendo esta su principal debilidad.

2.4.3. Modelo de Circulación General CSIRO ACCESS 1.3

Al igual que el desarrollo de patrones para la predicción del tiempo, el adelanto en modelos para el pronóstico estacional y futuro de la precipitación, es una actividad que llevan a cabo los centros y oficinas meteorológicas a nivel mundial, con el fin de conocer y predecir el comportamiento del sistema océano-atmósfera y los futuros cambios que esta pueda tener debido entre otras cosas a la actividad humana.

La base para la predicción estacional se encuentra en la variabilidad impulsada por procesos en el sistema climático, particularmente en el océano. El éxito de los pronósticos estacionales suelen estar relacionados con la capacidad del modelo en reproducir y predecir el estado en el que cambia el océano, por ejemplo los cambios asociados al ENSO; y como este interactúa con la atmósfera. Estos modelos acoplados océano-atmósfera utilizan las últimas observaciones realizadas por naves, satélites y estaciones terrestres, generando imágenes con la evolución de las fases de los océanos, la tierra y la atmósfera, logrando incluso pronosticar y proyectar los impactos que, a modo de ejemplo, puede provocar el ENSO en las diferentes zonas que afecta (Zhao, et al., 2013).

Es así como la Oficina de Meteorología de Australia (Bureau of Meteorology BOM, Australia) y la Organización de investigación científica e Industrial de la Comancomunidad (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia CSIRO) trabajaron en la creación de un modelo acoplado océano-atmósfera que permitiera la predicción estacional del tiempo, el cambio climático y la predicción de los cambios en el océano, dando origen al ACCESS 1.3.

CSIRO ACCESS 1.3 surge como modelo acoplado para complementar y potenciar las proyecciones realizadas por POAMA (Predictive ocean atmosphere model for Australia) modelo predictivo océano-atmósfera de Australia, elaborando pronósticos hábiles y útiles del clima, en pos de la búsqueda de mejoras en la aplicación de la gestión de los recursos hídricos, y los compartimentos futuros del océano y la atmósfera. Este fin investigativo fue gestado en una reunión en septiembre del 2008, cuando junto a la participación de 20 grupos de modelos climáticos de todo el mundo, el Programa Mundial de investigaciones climáticas (WCRP), acordaron promover una nueva serie de experimentos coordinados de modelos para la proyección del clima en el futuro. Esta reunión en conjunto con los experimentos constituye la Quinta Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) que tiene como finalidad:

- 1.- Evaluar el grado de realismo de los modelos en la simulación de un pasado reciente,
- 2.- El estudio de clima "previsibilidad" y la exploración de la capacidad de los modelos para predecir el clima en decenal escalas de tiempo, y, más generalmente proporcionando proyecciones del futuro cambio climático en dos escalas de tiempo, casi a término (a cerca de 2035) y largo plazo (hasta el 2100 y más allá),
- 3.- Comprender algunos de los factores responsables de las diferencias en las proyecciones del modelo, incluyendo la cuantificación de algunas evaluaciones clave como las relacionadas con las nubes y el ciclo del carbono (PCMDI, 2008)

CMIP5 tiene por objeto proporcionar un marco para experimentos coordinados sobre el cambio climático para los próximos cinco años y por lo tanto incluye simulaciones para la evaluación en el IE5, así como otros que se extienden más allá del IE5. Todos los resultados arrojados, fueron incorporados en el Quinto informe del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático, informes elaborados en el 2013.

2.5. Sensibilidad Ambiental en los ecosistemas altoandinos

La Sensibilidad Ambiental, se entiende como el potencial de afectación (transformación o cambio) que pueden sufrir los componentes ambientales como resultado de la alteración de los procesos físicos, bióticos y socioeconómicos debidos a las actividades de intervención antrópica del medio o debido a los procesos de desestabilización natural que experimenta el ambiente (Sandia & Henao, 2008).

La sensibilidad ambiental implica la definición de una escala de valoración, indicando el grado de susceptibilidad del medio en relación con el agente generador de perturbaciones. Las clases en cuestión y las valoraciones asignadas, tiene directa relación con las variables a pesquisar, las que de acuerdo a los objetivos de esta investigación, tienen directa relación con la precipitación y la temperatura y las variaciones que estas, provocan en los humedales del altiplano chileno.

La valoración de los grados de sensibilidad ambiental de un área se puede establecer través de dos criterios básicos, que son: 1) la evaluación de la capacidad de respuesta que poseen los distintos componentes ambientales para aceptar la incidencia de las actividades humanas sin sufrir transformación o cambios; y 2) los niveles de susceptibilidad que pueden tener los componentes ambientales al desarrollo de procesos de desestabilización natural en los que no intervienen acciones antrópicas de manera directa (Sandia & Henao, 2008).

De esta forma, la construcción de mapas de sensibilidad ambiental física y biológica, permiten identificar zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de cambios de origen natural y antrópico, teniendo la siguiente categorización según tipo de sensibilidad:

Sensibilidad Muy baja: áreas que toleran sin mayores complicaciones las perturbaciones provocadas, donde la recuperación podría ocurrir en forma natural.

Sensibilidad Baja: áreas que toleran sin problemas las perturbaciones provocadas, donde la recuperación, si bien no podría ocurrir en forma natural, puede darse con la aplicación de alguna medida de cuidado

Sensibilidad Media: se agrupan aquellos criterios donde existe un equilibrio ecológico o social frágil. Por lo que su recuperación y control exige, al momento de ejecutar un proyecto, la aplicación de medidas que involucran alguna complejidad.

Sensibilidad Alta: se destacan aquellos criterios donde los procesos de intervención modifican significativamente sus condiciones originales y donde es necesaria la aplicación de medidas complejas de tipos mitigantes.

Sensibilidad Muy alta: se destacan aquellos criterios donde los procesos de intervención modifican irreversiblemente sus condiciones originales y donde es necesaria la aplicación de medidas complejas de tipos compensatorias.

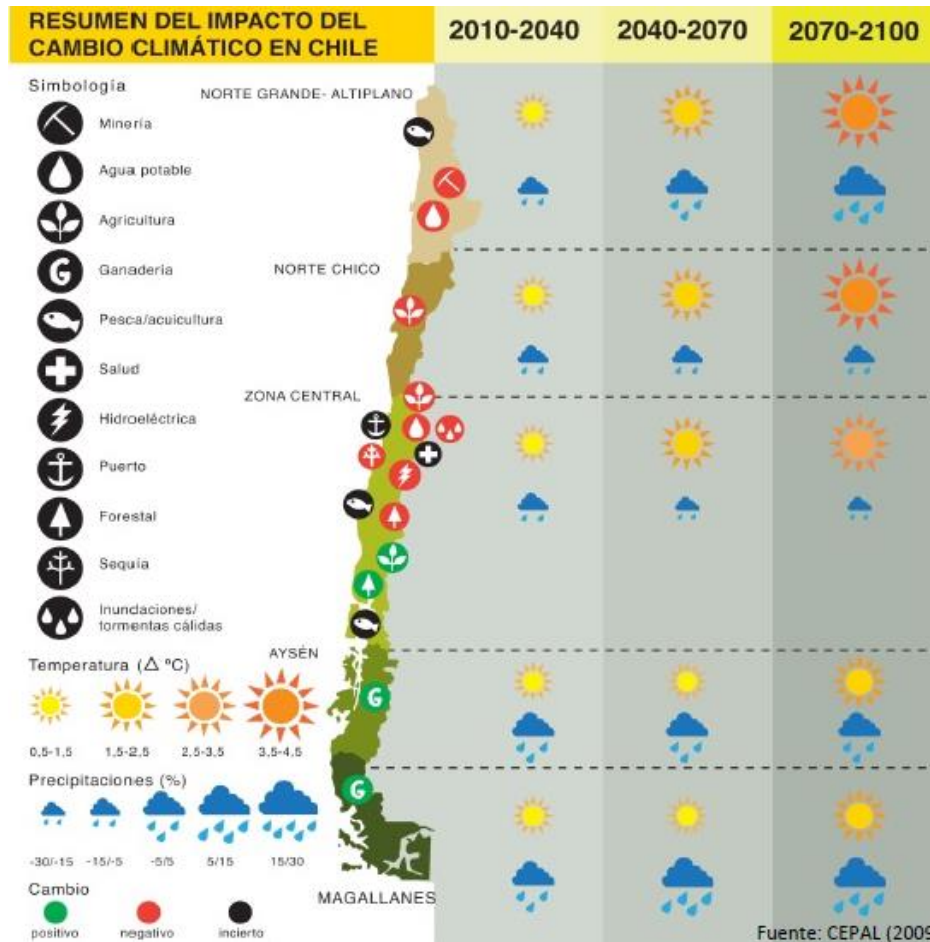
Cabe señalar que la categorización de sensibilidad mencionada abarca aspectos físicos y biológicos, en esta investigación sólo se abordaran los primeros, utilizando para ellos criterios de temperatura (grados Celsius) y precipitación (milímetros), donde su aumento o disminución indicará zonas de alta, media y baja sensibilidad en el norte grande y altiplano chileno.

Ahora bien, debido a la importancia que los humedales Altoandinos tienen en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, como fuente del recurso hídrico para el consumo humano en ciudades grandes como Arica, Iquique y Antofagasta, es que CONAF y el gobierno de Chile han elaborado guías y planes de adaptación al Cambio Climático y

conservación y seguimiento ambiental entregándole la categoría de ambientes vulnerables. (CONAF, 2010).

Según el plan de adaptación nacional para el Cambio Climático, y citando el Informe elaborado por CEPAL 2009, se evidencia un fuerte incremento de las temperaturas y las precipitaciones, donde el agua y la actividad minera sufrirán una fuerte baja, mientras que la pesca tendrá un futuro incierto, debido entre otras cosas a los cambios en el clima. (Ver figura 17)

Figura 17 Representación esquemática de los impactos del cambio climático y su relación con las proyecciones climáticas futuras



FUENTE (CEPAL, 2009).

"Los humedales y el agua: mantienen la vida y nos dan el sustento" es una de las directrices que guían el documento "Estrategia Regional de Conservación y Uso Sostenible de los Humedales Altoandinos" donde se formula la activa participación de los países que poseen humedales. La estrategia propone la participación de organismos gubernamentales y no gubernamentales, entre los cuales cabe la participación decidida de las instituciones académicas y de investigación, con el fin de generar información y construir capacidades destinadas a propiciar una gestión sostenible de los humedales Altoandinos, de modo que éstos sean conservados y continúen proveyendo bienes y servicios indispensables, derivados de sus recursos hídricos y su biodiversidad. Actualmente 123 países la han ratificado, lo que ha significado la identificación de 4042 Humedales de Importancia Internacional, siete de los cuales están ubicados en Chile. Los cambios previstos unidos al auge minero, hacen de los humedales, vegas y bofedales ambientes

muy vulnerables al cambio. La identificación de estos, junto con un conocimiento más específico de las variaciones que pueden sufrir en temperatura y precipitación, permitirán abordar de mejor manera su cuidado y preservación.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Para la realización de esta investigación, se utilizaron datos pluviométricos y de temperatura a escala mensual y anual para el período 1970 – 2013 correspondiente a 19 estaciones meteorológicas con datos pluviométricos y 7 estaciones con datos de temperatura.

Estos datos fueron obtenidos gracias a la compilación realizada por el Centro de Investigación sobre el Clima y la Resiliencia (CR)², los que generaron la base de datos de todas las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y de la Dirección General de Aguas (DGA).

Tabla 6. Estaciones pluviométricas del Norte Grande

N°	Estación	Latitud S	Longitud O	Altitud	Fuente
1	Visviri	-17,59	-69,48	4080	DGA
2	Cotacotani	-18,18	-69,23	4550	DGA
3	Chucuyo	-18,21	-69,29	4400	DGA
4	Guallatire	-18,49	-69,15	4240	DGA
5	Coyacagua	-20,05	-68,80	4013	DGA
6	Humapalca	-17,83	-69,70	3980	DGA
7	Alcerreca	-17,99	-69,65	3990	DGA
8	Chapiquia	-18,37	-69,54	3350	DGA
9	Belen	-18,46	-69,51	3240	DGA
10	Codpa	-18,83	-69,74	1870	DGA
11	Lequena	-21,65	-68,66	3320	DGA
12	Parshall n°2	-21,94	-68,51	3318	DGA
13	Inacaliri	-22,02	-68,06	4040	DGA
14	Toconce	-22,25	-68,17	3310	DGA
15	Ayquina	-22,27	-68,31	3031	DGA
16	Chacalluta	-18,35	-70,33	63	DMC
17	Diego Aracena	-20,54	-70,17	52	DMC
18	El Loa	-22,49	-69,90	2293	DMC
19	Cerro Moreno	-23,45	-70,44	113	DMC

Tabla 7. Estaciones Térmicas del Norte Grande

N°	Estación	Latitud S	Longitud O	Altitud	Fuente
1	Azapa	-18,51	-70,18	365	DGA
2	Codpa	-18,83	-69,74	1870	DGA
3	Parshall n°2	-21,94	-68,51	3318	DGA
4	Chacalluta	-18,35	-70,33	63	DMC
5	Diego Aracena	-20,54	-70,17	52	DMC
6	El Loa	-22,49	-69,90	2293	DMC
7	Cerro Moreno	-23,45	-70,44	113	DMC

Además de la base de datos, se utilizarán los modelos creados por el GCM CSIRO ACCESS 1.3 para el escenario que presenta los cambios más drásticos, el RCP 8.5 para el año 2080, propuestos en la última entrega del Informe del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático del 2013.

Para la proyección, se utilizarán dos líneas base, las que la integrarse entregaran la proyección final de los cambios esperados para el área en cuestión:

WORLDCLIM

El proyecto Worldclim corresponde a una serie de superficies climáticas interpoladas de muy alta resolución, disponible de forma global para zonas terrestres (salvo la Antártica), que tiene como característica principal, además de su alcance global, el hecho de tener una resolución de 30 arco segundos, lo que es equivalente a una resolución horizontal aproximada de 1 kilómetro en la latitud del Ecuador.

Para su elaboración se contó con la colaboración de datos climáticos provenientes del NOAA, Organización meteorológica Mundial (WMO), FAOCLIM, Centro Internacional para la Agricultura Tropical (CIAT), utilizando un total de 47.554 estaciones con datos de precipitación, 24.542 para temperatura media y 14835 para temperaturas mínimas y máximas.

Una de las principales debilidades de esta cobertura, es que las estaciones no están repartidas de forma homogénea, obedeciendo a patrones de concentración de población y nivel de desarrollo (además de niveles de inversión en redes de monitoreo meteorológico y acceso a información), siendo particularmente pobre su alimentación en el ártico (incluyendo Groenlandia), Siberia, el Amazonas, la Patagonia, Tíbet, el Sahara, y zonas desérticas y montañosas como es el caso del Altiplano.

SUPERFICIES CLIMÁTICAS DE PLISCOFF ET AL (2014)

La segunda línea base a proyectar, fueron las coberturas climáticas elaboradas por Pliscoff et al (2014), utilizadas para modelamiento de distribución de especies. En comparación con Worldclim, si bien utiliza el mismo algoritmo de interpolación en el mismo software, utiliza como fuente de información 930 estaciones meteorológicas en Chile, Perú, Bolivia y Argentina. Posee el mismo alcance de resolución que Worldclim 30 arco segundos, permitiendo un precisión cercana a 1 Km.

La principal diferencia con Worldclim es el nivel de precisión local que alcanza. Las comparaciones realizadas por los autores entre la información arrojada por las estaciones locales, contra las de Worldclim, resultaban en diferencias importantes, particularmente en la temperatura. Esto debido a las mismas debilidades señaladas en Worldclim, al considerar pocas estaciones locales, además de las propiedades propias del área de estudio, donde Worldclim admite perder fiabilidad debido a las características topográficas locales. Debido a esto las coberturas climáticas

tiene el mismo tipo de debilidad, en parte gracias a la mal distribución de las estaciones meteorológicas, teniendo un exceso de información en la zona central, en desmedro de las zonas extremas donde la falta de series complica el trabajo con estas estaciones, particularmente en el Desierto de Atacama, el Altiplano y la Patagonia.

Cabe mencionar, que ambas proyecciones trabajan en base a las 19 variables bioclimáticas. Estas variables se basan en datos de temperatura (en grados Celsius multiplicados por 10) y precipitación (en milímetros), siendo utilizadas normalmente para modelamientos de nichos ecológicos. Estas variables están divididas de la siguiente manera desde la BIO1 a la BIO11, corresponden a rangos de temperatura y desde la BIO12 a la BIO19 corresponden a rangos de precipitación. Las utilizadas son:

- BIO1: Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C} \times 10$).
- BIO5: Temperatura máxima del mes más cálido: Corresponde a la temperatura máxima más alta entre todas las semanas del año ($^{\circ}\text{C} \times 10$).
- BIO6: Temperatura mínima del mes más frío: Corresponde a la temperatura mínima más baja entre todas las semanas del año ($^{\circ}\text{C} \times 10$).
- BIO12: Precipitación anual: Corresponde a la suma de las doce estimaciones de precipitación mensuales (en milímetros).
- BIO16: Precipitación del trimestre más húmedo: El trimestre más húmedo del año es calculado a partir de la precipitación mensual (en milímetros).
- BIO17: Precipitación de trimestre más seco: El trimestre más seco del año es calculado a partir de la precipitación mensual (en milímetros).

En el caso de esta investigación y para los fines buscados, se trabajó con cinco de las diecinueve variables bioclimáticas: Temperatura media anual (Bio1), Temperatura máxima del mes más cálido (Bio5), Temperatura mínima del mes más frío (Bio6), Precipitación media anual (Bio12), Precipitación del trimestre más húmedo (Bio16), Precipitación del trimestre más seco (Bio17).

3.2.- Métodos

Los materiales serán trabajados de acuerdo a los tres objetivos formulados en la presente investigación de la siguiente manera:

1. Elaborar una base de datos (1970-2013) para caracterizar y evaluar las tendencias de precipitación y temperatura.

Los datos pluviométricos en el altiplano, son discontinuos, escasos y con vacíos en días, meses y años anteriores a 1970. Esto se debe, a que la gran mayoría de las estaciones pluviométricas pertenecientes a la DGA se encuentran en sectores de poco acceso por lo que la recolección de datos es realizada de manera parcelada y donde los desperfectos, el mal funcionamiento, y la falta de profesionales capacitados para dicha labor son algunos de los inconvenientes que se hacen presentes a la hora de completar series de datos tan extensas.

Así aquellas estaciones que cumplieran con un 95% de la información contenida para los años en cuestión, fueron seleccionadas para la confección de la base de datos en Excel, donde se dispuso a ordenar la información de las estaciones pluviométricas de norte a sur, quedando un total de 19 estaciones pluviométricas y 7 estaciones de temperatura.

De esta manera, con la base de datos elaborada, se procedió al análisis de los datos de cada estación meteorológica calculando tanto para precipitación como para temperatura las siguientes medidas estadísticas:

Tabla 8. Medidas estadísticas calculadas para precipitación y temperatura

Precipitación	Temperatura
Coeficiente de Correlación (Pearson) Coeficiente de Determinación Significancia al 95% (p valor) Tendencia Decadal	Coeficiente de Correlación (Pearson) Significancia al 95% (p valor) Tendencia Decadal

- **Coeficiente de Correlación (Pearson):** El coeficiente de correlación se utiliza para medir la magnitud de la relación lineal entre dos variables, es decir, indica cuán fuerte o débil es una relación lineal. Se denota con la letra r y también se le conoce como r de Pearson en honor a Karl Pearson (Gutierrez, 2012). Se calcula de la siguiente manera

$$r = S_{xy}/S_x S_y$$

Donde

S_{xy} = covarianza muestral entre las variables x - y

S_x = desviación estándar muestral de x

S_y = desviación estándar muestral de y

- **Coeficiente de Determinación:** Es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, y entrega la proporción de variación de la variable Y que es explicada por la variable X (que es la variable predictora o explicativa). Si la proporción es igual a 0, significa que la variable predictora no tiene capacidad predictiva de la variable a predecir (variable Y). Cuando mayor sea la proporcionalidad mejor será la predicción. Si llegara a ser igual a 1, la variable predictora explicaría toda la variación de Y , y las predicciones no tendrían error. (Gutierrez, 2012). Se calcula de la siguiente forma:

$$r^2 = xy$$

- **Significación estadística:** El concepto de significación estadística se relaciona con la necesidad de probar hipótesis. Este proceso se realiza utilizando “pruebas de hipótesis” las que permiten cuantificar hasta qué punto la variabilidad de la muestra en estudio es responsable de los resultados obtenidos en el estudio. De esta manera la estadística permite entregar un nivel de seguridad que la mayoría de las investigaciones es igual al 95% probando o rechazando la hipótesis en cuestión. (Manterola D & Pineda N, 2008) Este valor fue obtenido a través de la aplicación en línea de *Daniel Soper* <http://www.danielsoper.com/>.
- **Tendencia Decadal:** Es una predicción que permite calcular variaciones en datos a una escala de 10 a 30 años. En esta investigación se utilizaron para analizar los cambios (aumentos y/o disminuciones) en los montos de precipitación y temperatura en las estaciones del Norte Grande.

Con estos datos calculados se procede a la caracterización y evaluación de las tendencias de las 19 estaciones meteorológicas para precipitación y las 7 estaciones meteorológicas para temperatura, las que fueron agrupadas de la siguiente manera:

Tabla 9. Distribución Geográfica de las Estaciones Meteorológicas

Sector	Estaciones Meteorológicas
Costeras	Chacalluta, Diego Aracena y Cerro Moreno
Valles y Quebradas	Codpa
Prealtiplánicas	Ayquina, Belén, Toconce, Parshall n°2, Lequena Humapalca, Alcerreca y Chapiquia
Altiplánicas	Coyacagua, Inacaliri, Visviri, Guallatire, Chucuyo y Cotacotani

2. *Evaluar en qué medida las teleconexiones explican la precipitación de verano en el Norte Grande y Altiplano Chileno.*

Para evaluar como las Teleconexiones explican los patrones de precipitación y temperatura en el Norte Grande y Altiplano Chileno, se bajaron desde la página del NOAA:

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>

http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/TNI_N34/index.html#Sec5

De esta manera, se obtuvieron los índices para cada una de las seis teleconexiones que pueden tener relación con el aumento o disminución de la precipitación en el área de estudio.

Acto seguido se procedió a incorporar dichos valores a la base de datos en Excel. Los datos agregados corresponden a: Índice de la Oscilación del Sur (SOI), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Índice ENSO multivariado (MEI), Índice El Niño 3-4, Índice Monzón Sudamericano (SASMI) y el Índice El Niño Modoki. Estos índices se encuentran completos – a excepción de El Niño 3-4 que llega hasta el 2007 – y sus valores permitieron la caracterización de las precipitaciones y la influencia que cada uno tendría en el aumento o disminución de la lluvia en el Altiplano. Para lograr esto se calculó cada índice con un desfase. Este desfase tiene directa relación con la temporada de lluvia en el Altiplano, correspondiente a los meses de diciembre a marzo; y en base a estos meses el desfase fue calculado de la siguiente manera (ver tabla 9):

Tabla 10 . Desfase de los índices de Teleconexiones utilizadas

Normal	Diciembre, Enero, Febrero y Marzo
Desfase -1	Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero
Desfase -2	Octubre, Noviembre, Diciembre y Enero
Desfase -3	Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre

Hay que destacar que en el cálculo de los índices, se utilizaron datos del año anterior al analizado, donde si el año a analizar es 1980, los datos a utilizar serán los del año 1979 desde septiembre a diciembre, ya que es en esos meses donde se configura la influencia de la teleconexión en la precipitación estival correspondiente a 1980.

Calculados los desfases de cada uno de los índices de las teleconexiones, se procedió a calcular:

- **Regresión Múltiple:** Se utiliza la regresión múltiple cuando se estudia la posible relación entre varias variables independientes (predictoras o explicativas) y otra variable dependiente (Gutierrez, 2012). Se calcula de la siguiente manera:

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_pX_p$$

Dónde:

A: Es una constante

X1: Variable predictora o explicativa

B1: Coeficiente de la variable predictora.

- **Valor Crítico F:** El valor crítico de la prueba F es una prueba estadística científica para determinar la distribución de datos en virtud de la teoría del valor predeterminado, y es la forma en que los datos se estructuran sobre la base de la hipótesis de los estándares corrientes. Se utiliza para comparar diferentes modelos estadísticos y encontrar qué conjunto de datos es más relevante para el conjunto de datos muestreados. Es equivalente al p-valor.

Estos cálculos fueron ingresados a una planilla Excel. Donde, tras un pequeño análisis se determinó cuál de las teleconexiones y sus respectivos desfases explicaban la precipitación de verano en las 19 estaciones del norte grande y altiplano chileno.

Para finalizar, con la evaluación de cómo las teleconexiones explican las precipitaciones de verano en el área de estudio, se procedió al cálculo de la interpolación mediante *Spline* el cual ofrece un resultado más continuo, suave y adaptable, si se ajustan adecuadamente sus parámetros, se suele llegar a una interpolación de mayor precisión, pero debe controlar que no genere salidas de rango excesivas, causadas habitualmente por datos muy distintos en relación a su proximidad (Pesquer, et al., 2007).

Existen dos métodos de *Spline*: regularizado y de tensión. El método regularizado crea una superficie suave que cambia gradualmente con los valores que pueden estar afuera del rango de datos de muestra. El método de tensión controla la rigidez de la superficie de acuerdo al carácter del fenómeno modelado, además crea una superficie menos suave con valores que están más restringidos por el rango de datos de la muestra (ArcGis Resources, 2013).

La opción utilizada para interpolar es *Spline* de tensión, su función se basa en que modifica el criterio de minimización para que los términos de la derivada primera se incorporen a los criterios de minimización. El parámetro de peso especifica el peso adjunto a los términos de la derivada primera durante la minimización, que se denomina Φ (phi) en la ecuación. Un peso de cero resulta en la interpolación por *Spline* por lámina delgada básica. Al utilizar un valor de peso más grande, se reduce la rigidez de la lámina y, a medida que phi se acerca al infinito en el límite, la superficie se aproxima a la forma de una membrana, u hoja de goma, que pasa por los puntos. La superficie interpolada es suave. Las derivadas primeras son continuas pero no suaves (ArcGis Resources, 2013).

La ecuación de *Spline* de tensión es la siguiente:

$$R(r) = -\frac{1}{2\pi\phi^2} \left[\ln\left(\frac{r\phi}{2}\right) + c + K_o(r\phi) \right]$$

Dónde:

R: Es la distancia entre el punto y la muestra.

ϕ_2 : Es el parámetro de Peso.

Ko: Es la función de Bessel modificada.

C: Es una constante igual a 0,577215.

3. *Analizar los cambios climáticos derivados del peor escenario del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático para el 2080, en el Norte Grande y el Altiplano, distinguiendo las áreas más afectadas.*

Para lograr este objetivo se trabajó con lo investigado por Henríquez (inédito), donde la construcción y proyección de los modelos y las variables fueron trabajadas de la siguiente manera:

- Proyección de Variables Bioclimáticas a escenario de forzamiento radiativo.

Se realizaron las proyecciones del modelo de circulación ACCESS 1.3 para el año 2080 en el escenario RCP 8.5. La selección de este modelo se justifica como una continuación y complemento de la investigación realizada por Sarricolea & Romero 2015.

Esta serie de datos fue obtenida del portal de internet del programa de investigación CCAFS (Climate Change, Agriculture and Food Security) habilitada en <http://www.ccafs-climate.org/data/>

La resolución escogida es compatible con las superficies creadas por Pliscoff *et al.* (2014), es decir 1 km. Cabe resaltar, que es la mejor resolución existente, permitiendo así una mejor representación en áreas heterogéneas, ajustándose de mejor forma a la realidad de Chile (extensión latitudinal, relieve entre 0 y más de 6.000 m.s.n.m., superficie insular y de fiordos, etc.)

Se privilegió el formato ASCII por la universalidad y alta compatibilidad que permite, y la versatilidad multi-sofware, además de la poca exigencia de espacio de almacenamiento mientras se encuentre comprimido (en formato RAR, por ejemplo).

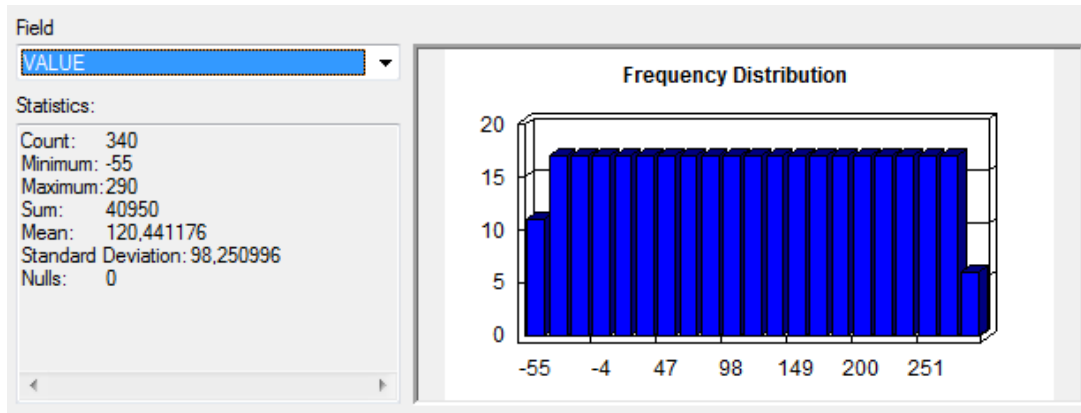
Sin embargo, estas proyecciones encuentran realizadas sobre las superficies de línea base (1950-2000) generadas por el proyecto Worldclim (Hijmans *et al.*, 2005). Pliscoff *et al.* (2014) señala la existencia de diferencias de consideración entre los datos arrojados por estaciones meteorológicas locales y los datos de las superficies Worldclim; por lo que se decide utilizar las superficies climáticas generadas por Pliscoff *et al.* (2014) ya que poseen una mayor cantidad de observatorios meteorológicos, sobre todo con datos de precipitación.

Para lograr la proyección de los modelos desde las superficies climáticas generadas por Pliscoff *et al.* (2014), y no desde la línea base de Worldclim, se requirió la obtención de la **anomalía** (futuro-Worldclim) y luego el futuro según el escenario base de Pliscoff *et al.* (2014), resultado de la **anomalía** más variable actual.

Para lograr esto, lo primero que se debió realizar, fue ajustar el área de cobertura de cada raster de proyección global obtenido, a exactamente la misma área de las superficies climáticas a proyectar. Esto se llevó a cabo mediante la función EXTRACT BY MASK de la extensión Spatial Analyst, del software ARCGIS 10.2. Como máscara, se utilizó uno de los raster de la cobertura climática que se desea proyectar. Lo mismo fue realizado para cada variable de la línea base del proyecto Worldclim, permitiendo así, que cada raster resultante de anomalía, se ajustara perfectamente a las superficies que se desean proyectar.

La recuperación de este valor de anomalía para cada variable, se obtuvo de calcular la diferencia entre el modelo proyectado en Worldclim, y la línea base entregada por el mismo proyecto (disponible en <http://www.worldclim.org/current>) pero ya adaptadas al área de estudio ambas. Este cálculo de diferencia se realizó mediante la función MINUS, del módulo MATH, de Spatial Analyst.

Figura 18. Estadísticas iniciales de la variable BIO14 proyectada con el modelo CSIRO ACCESS 1.3 al escenario RCP 8.5 al año 2080



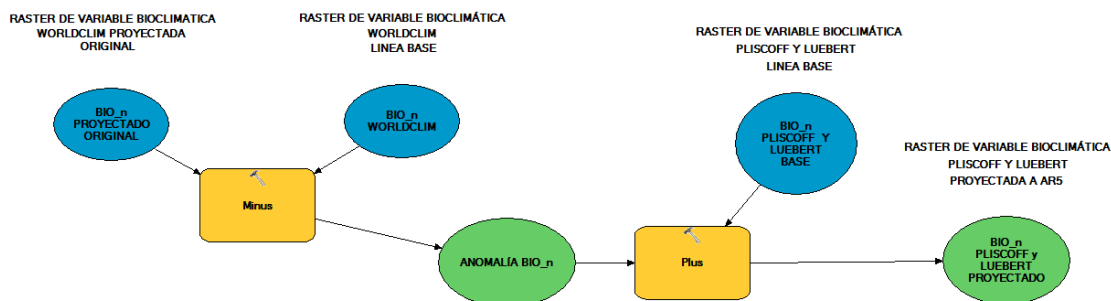
Luego, esta anomalía fue agregada a las superficies de Pliscoff et al. (2014) mediante la función PLUS del mismo módulo. Sin embargo, al revisar las estadísticas de los datos resultantes, se detectó que las variables de precipitación presentaban valores negativos dentro de sus histogramas (Ver figura 18)

Lo anterior, se debe a que en la proyección del modelo, la magnitud de disminución estimada en la anomalía, es superior al valor de la línea base utilizada, ocurriendo esto principalmente en la zona del desierto de Atacama.

Para su corrección, fue necesario adecuar en el caso de estas variables, una condicionante que llevase todos los valores negativos, a cero. Esto se realizó mediante la función CON, del módulo CONDITIONAL de Spatial Analyst, seleccionando como requisito tener un valor menor a cero. Esto generó que los píxeles que si cumplían con esta condición fueran llevadas a cero, mientras que los píxeles que no, permanecieran sin modificar.

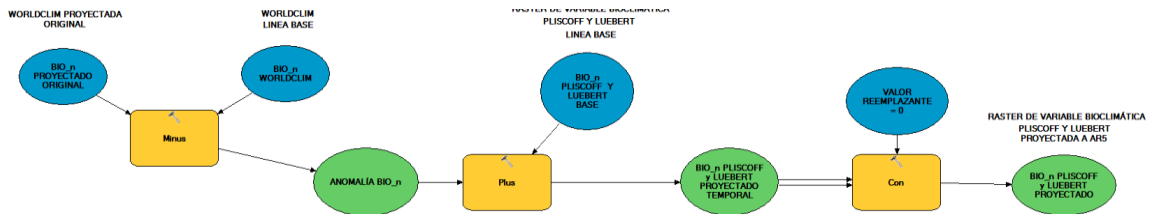
Los archivos resultantes, fueron convertidos nuevamente a formato ASCII por las ventajas ya mencionadas de este formato. Debido a lo repetitivo del proceso, para articular la secuencia de funciones, se utilizó la herramienta MODEL BUILDER de ARCGIS 10.2, permitiendo sistematizar esta serie de pasos y facilitar su ejecución.

Figura 19. Sistematización de la proyección de una variable bioclimática en el molderbuilder ArcGis 10.2



Este modelo base solo resulta útil con variables correspondientes a temperatura. Se diferencia del modelo para temperaturas en la necesidad de la función CON para eliminar valores de precipitación negativos.

Figura 20. Sistematización de la proyección bioclimática de precipitación en el moldebuilder (ArcGis 10.2)



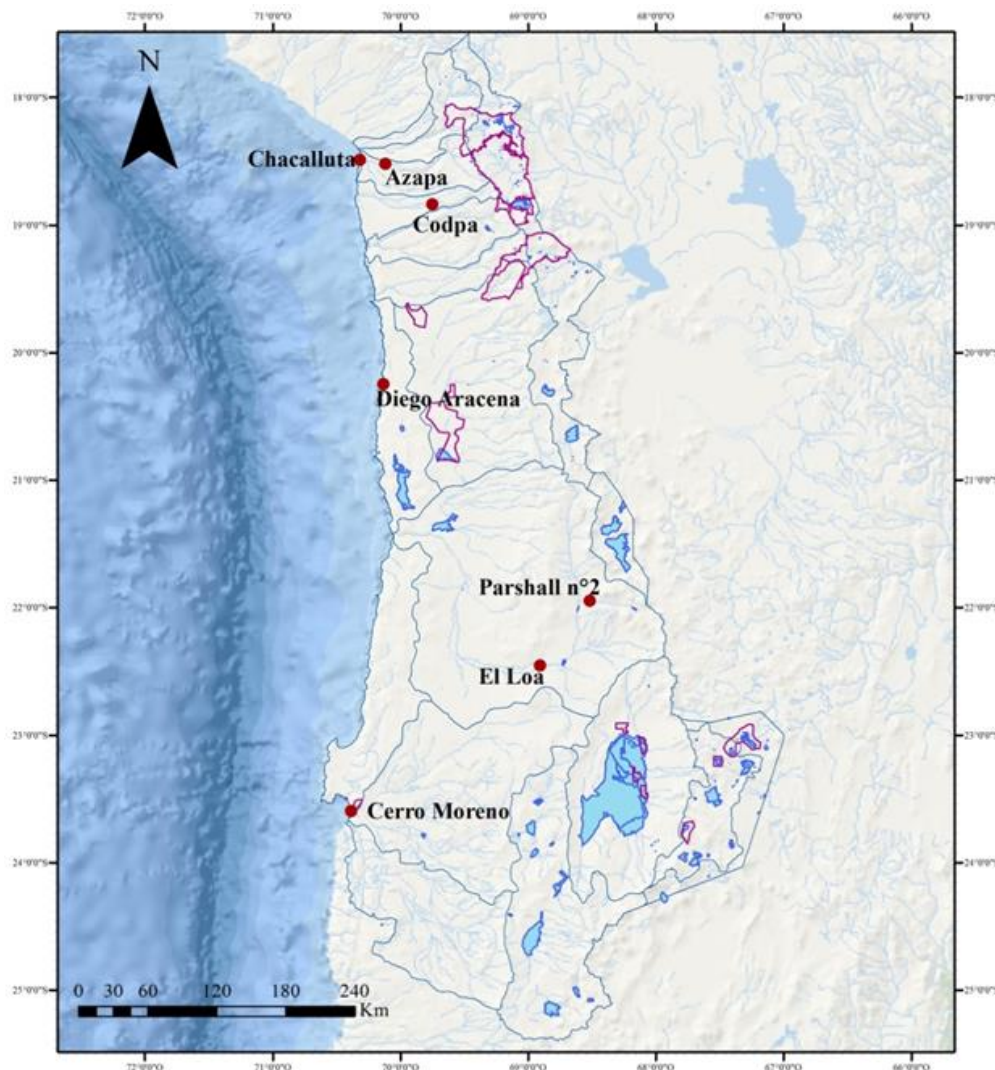
CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Caracterización de comportamientos y patrones de la precipitación y temperatura en el Norte Grande y el Altiplano Chileno

4.1.1 Tendencias en temperatura en el Norte Grande de Chile

Para caracterizar los patrones de comportamiento de la temperatura se utilizaron datos de 44 años, tanto del Altiplano como el litoral. La existencia de datos de detalle en el Norte Grande de Chile es escasa, por lo que se contó con 7 estaciones que cumplen con algunos criterios fijados, y que se encuentran detallados en la metodología; a saber: valores perdidos por debajo el 5% (data missing). La siguiente figura muestra la localización de estaciones.

Figura 21. Ubicación de las Estaciones en el Área de Estudio



Leyenda

- Estaciones Termopluviométricas
- ▭ Áreas SNASPE
- ▭ Cuerpos de Agua
- ▭ Cuencas

Estaciones Termopluviométricas del Norte Grande

Se analizaron por zonas (costera, valles y quebradas y pre-altiplánicas), ello con el fin de comparar con el estudio realizado por Vuille *et al.* (2015).

4.1.1.1. Estaciones costeras

Corresponden a las estaciones ubicadas en los aeródromos Chacalluta, Diego Aracena y Cerro Moreno, de las ciudades de Arica, Iquique y Antofagasta respectivamente. Todas ellas pertenecientes a la DMC, y son las que poseen mayor extensión en los registros de temperatura en el norte grande, por lo que su información fue indispensable para conocer el comportamiento de la temperatura mínima y máxima durante el período analizado.

a) Chacalluta

Estación costera ubicada a 18 kilómetros al norte de la ciudad de Arica, presenta un comportamiento de alta variabilidad en cuanto a la temperatura, donde los *peak* se presentaron durante el año 1983 y 1987 marcando las mínimas y máximas más altas en los años en estudio.

Con respecto a la tendencia, los gráficos muestran que los períodos con mayores alzas en cuanto a las temperaturas mínimas, fue decenio comprendido entre los años 1970 a 1980, donde se evidencian el aumento de la pendiente el cual prosigue hasta finalizar los años en estudio (Ver gráfico 1).

En cuanto a las temperaturas máximas, nuevamente se presenta al decenio 1970 – 1980 como el período donde se muestra un descenso importante en la pendiente, el cual al igual que con las temperaturas mínimas, este se mantiene hasta terminar los años en estudios (ver gráfico 2).

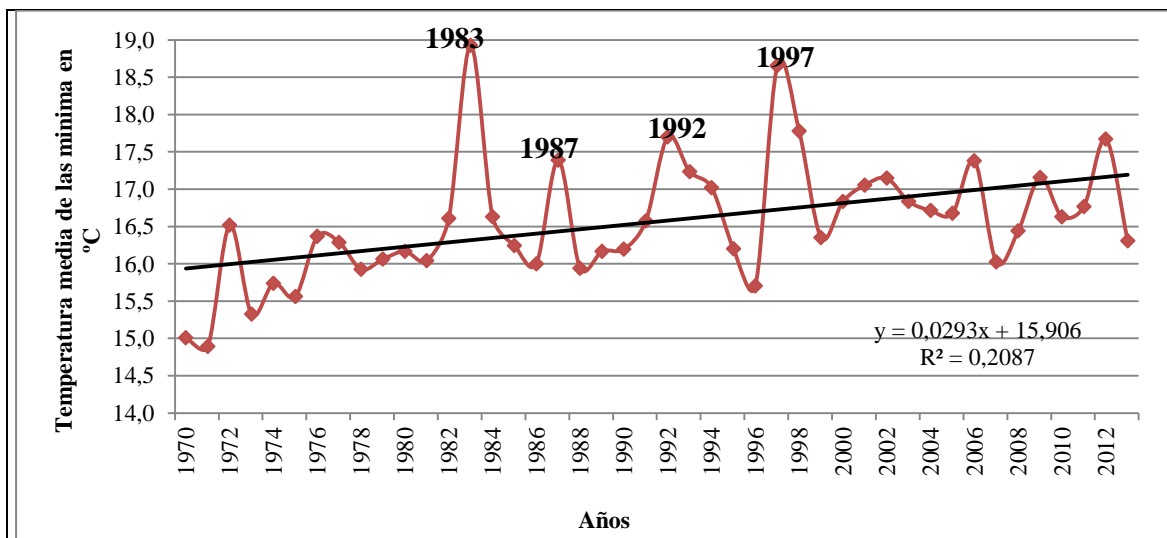


Gráfico 1. Temperaturas mínimas estación Chacalluta

Mínimas: Han tenido un aumento sostenido desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0,3°C en 10 años y 0,9°C en 40 años, coincidiendo con lo expuesto por el IPCC 2013, mostrando sus mayores alzas medias anuales en los años 1983 y 1997.

La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los 16,54°C, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas seguirán en un aumento paulatino superando los 17°C.

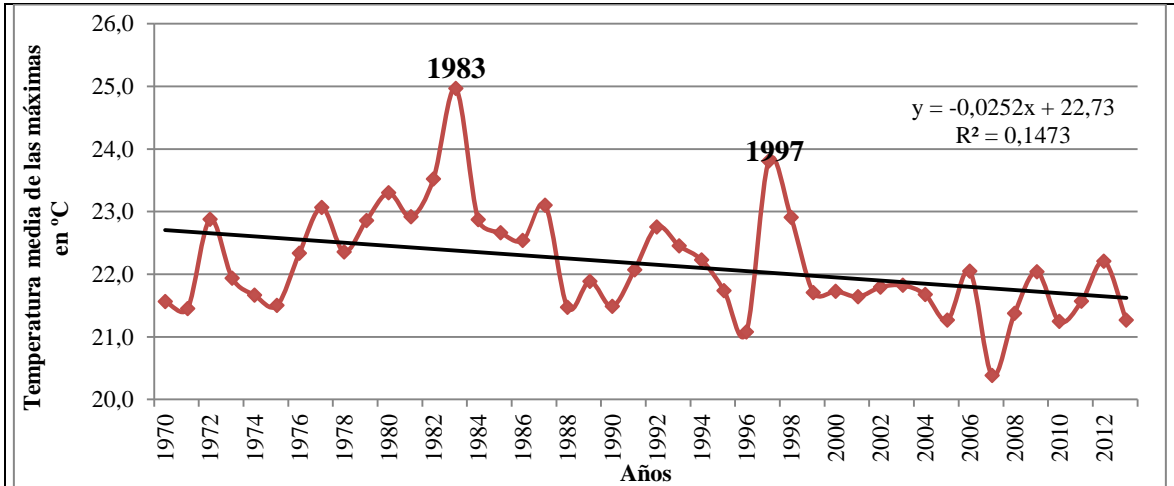


Gráfico 2. Temperaturas Máximas Estación Chacalluta

Máximas: Han tenido una disminución sostenida desde 1970 al 2013, correspondiendo a $-0,2^{\circ}\text{C}$ en 10 años y $-0,8^{\circ}\text{C}$ en treinta años. Las temperaturas máximas corresponden a los años 1983 y 1997 cuyos valores llegaron a los $24,9^{\circ}\text{C}$ y $23,8^{\circ}\text{C}$ respectivamente. La temperatura media máxima para el período en estudio es de $22,2^{\circ}\text{C}$, y la tendencia muestra que las temperaturas máximas continuaran bajando bordeando los 22°C .

b) Diego Aracena

Estación costera ubicada a 45 kilómetros al Sur de la ciudad de Iquique, presenta un comportamiento discreto en cuanto a las temperaturas mínimas y máximas durante los cuarenta años en estudio.

Se parecía en las gráficas que las temperaturas mínimas presentaron un aumento sostenido desde 1970 hasta 1992, período en el cual la pendiente tiende a detener su alza sostenida (ver gráfico 3).

Con respecto a las temperaturas máximas, la pendiente se mantiene más bien discreta, presentando una disminución en las máximas las que bordean entre los $21,3^{\circ}\text{C}$ y los $21,2^{\circ}\text{C}$ (ver gráfico 4)

Si bien es cierto en las figuras se aprecian temperaturas que se escapan al promedio como los años 1983, 1987, 1992, 1997 y 2009 la gran mayoría oscila entre 1 a 1,5 grados de diferencia dentro del período en estudio, manteniendo la tendencia tanto al alza de las mínimas y al descenso de las máximas, como se puede apreciar en las gráficas a continuación:

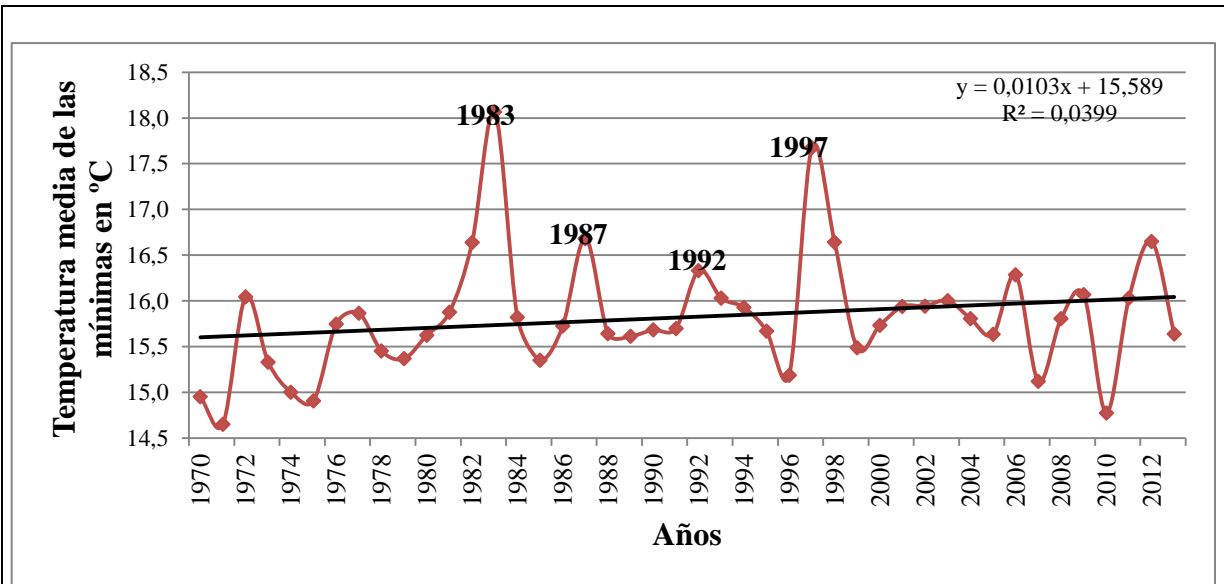


Gráfico 3. Temperaturas mínimas Estación Diego Aracena

Mínimas: Han tenido un aumento desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0,1°C en 10 años y 0,3°C en treinta años, mostrando sus mayores alzas medias anuales en los años 1983 y 1997.

La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los 15,8°C, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas seguirán aumentando sobrepasando los 16°C.

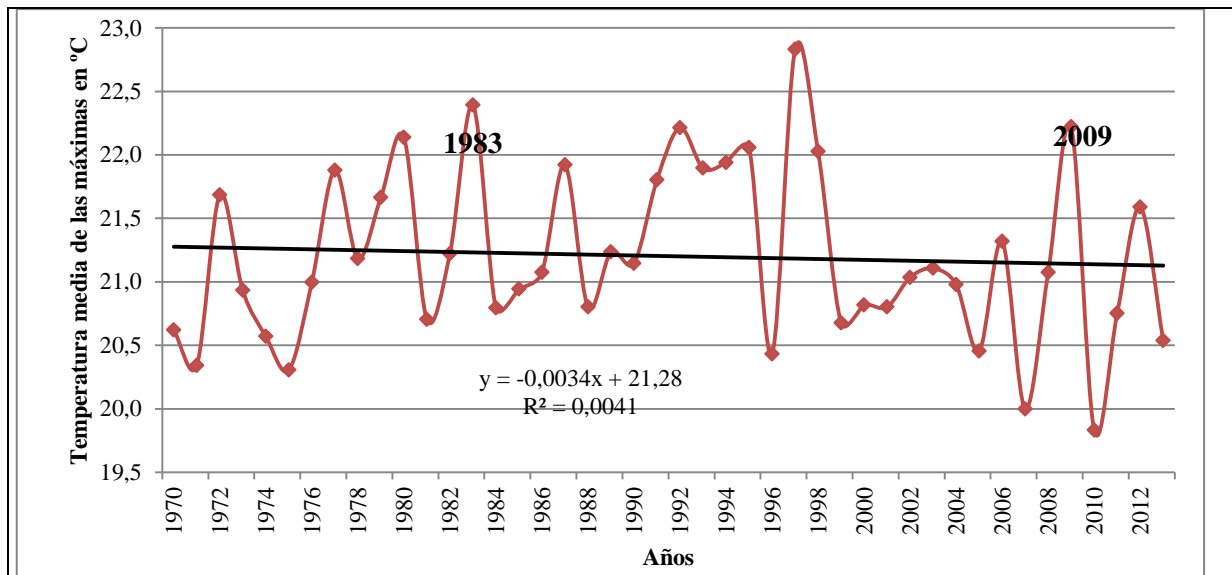


Gráfico 4. Temperaturas Máximas Estación Diego Aracena

Máximas: Si bien es cierto en la gráfica la línea de tendencia refleja una pequeña disminución de las temperaturas, en la práctica las temperaturas han tenido una leve alza de 0,03°C en 10 años y de 0,1°C en treinta años. Presenta sus mayores alzas los años 1983, 1997 y 2009, presentando temperaturas promedio que bordean los 23°C. La temperatura media máxima para el período en estudio es de 21,3°C, y la tendencia muestra que las temperaturas seguirán disminuyendo.

c) **Cerro Moreno**

Estación costera ubicada a 26,6 kilómetros al Norte de Antofagasta, presenta un comportamiento similar a las estaciones descritas con anterioridad, donde se

presenta una disminución paulatina de la temperatura media de las máximas y un aumento de la temperatura media de las mínimas.

En las gráficas se aprecia una alza sostenido en las temperaturas mínimas durante los años 1970 a 1992, período en el que se presenta un aumento en cuanto a la pendiente, el cual es prolongado hasta el 2013(ver gráfico 5).

En cuanto a las temperaturas máximas estas presentan un declive considerable desde 1970 a 1992, año en el que la pendiente desacelera su descenso, para continuar de una manera menos pronunciada (ver gráfico 6).

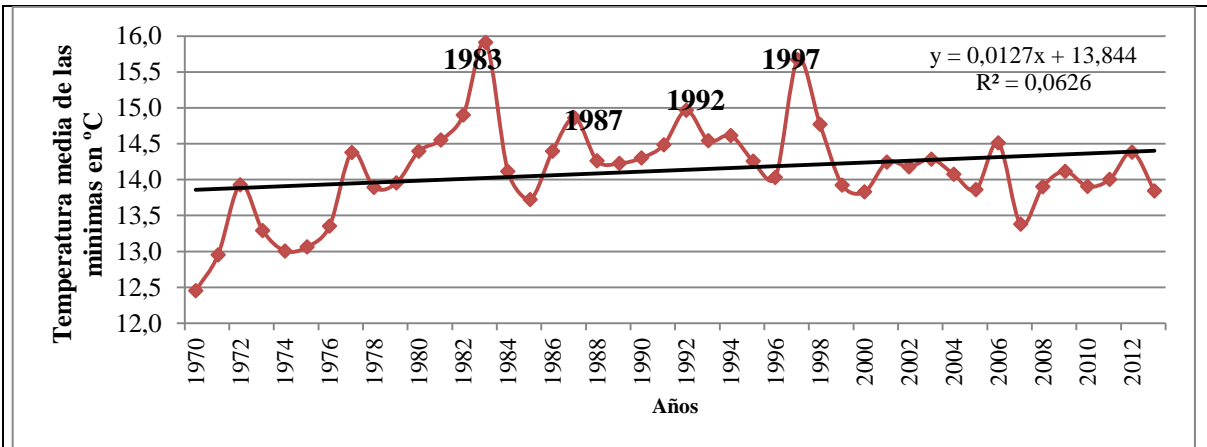


Gráfico 5. Temperaturas Mínimas Estación Cerro Moreno

Mínimas: Han tenido un aumento desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0,12°C en 10 años y 0,4°C en treinta años, mostrando sus mayores alzas medias anuales en los años 1983, 1987, 1992 y 1997. La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los 14,1°C, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas tienden a la alza, aunque de manera mesurada, alcanzando una media promedio de 14,5°C.

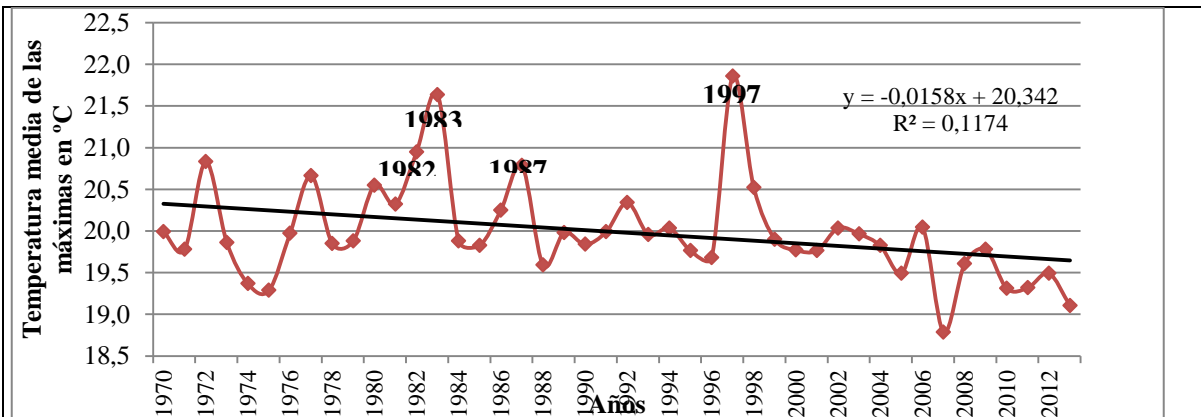


Gráfico 6. Temperaturas Máximas Estación Cerro Moreno

Máximas: Al igual que la estación Chacalluta, éstas han tenido una baja sostenida desde 1970 al 2013, correspondiendo a -0,2°C en 10 años y -0,5°C en treinta años. Las temperaturas máximas durante los cuarenta años estudiados corresponden a los años 1983 y 1997 donde las máximas llegaron a los 21,6°C y 21,9°C respectivamente. La temperatura media máxima para el período en estudio es de 20°C, y la tendencia muestra que las temperaturas máximas continúan bajando bordeando los 19,5°C.

4.1.1.2. Estaciones de Valles y Quebradas

Corresponden a las estaciones ubicadas en valles y quebradas de Azapa y Codpa, siendo una de las pocas estaciones que cumplían con valores perdidos por debajo el 5% (data missing). Su ubicación entrega información importante sobre el comportamiento de la temperatura en los valles, y sus variaciones durante los 44 años de estudio, evidenciando las diferencias entre las estaciones costeras y las altiplánicas, siendo *estaciones de transición*.

a) Azapa

Estación ubicada a 13 Kilómetros al este de la ciudad de Arica, presenta un comportamiento más bien continuo en las temperaturas, donde la tendencia en cuanto a las mínimas y máximas reflejan una leve disminución de las primeras en 0,2°C con una pendiente no muy pronunciada desde 1970 hasta 1990 para luego estancarse y seguir con su descenso hasta finales del 2013 (ver gráfico 7); mientras que, las segundas, muestran una ligera alza en las máximas de 0,14°C y al igual que las temperaturas presentan una alza sostenida desde 1970 hasta 1996 *estancándose*, para luego continuar en alza hasta 2013 (ver gráfico 7), tal como se detalla a continuación:

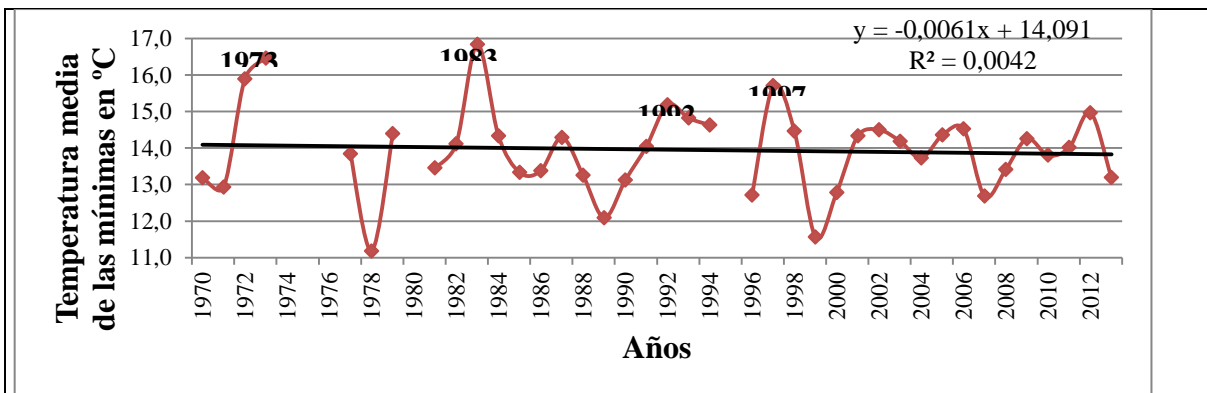


Gráfico 7. Temperatura Mínima Estación Azapa

Mínimas: Han tenido una leve disminución desde 1970 al 2013, correspondiendo a -0,06°C en 10 años y -0,14°C en treinta años. Casos aislados como los años 1983 y 1997 (catalogados como años cálidos) muestran mínimas que se escapan a los valores medios superando los 16°C; mientras que los años 1978 y 1999 serían los más fríos con temperaturas mínimas que alcanzaron los 11°C. La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los 13,9°C, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas tienden a la baja, aunque de manera mesurada.

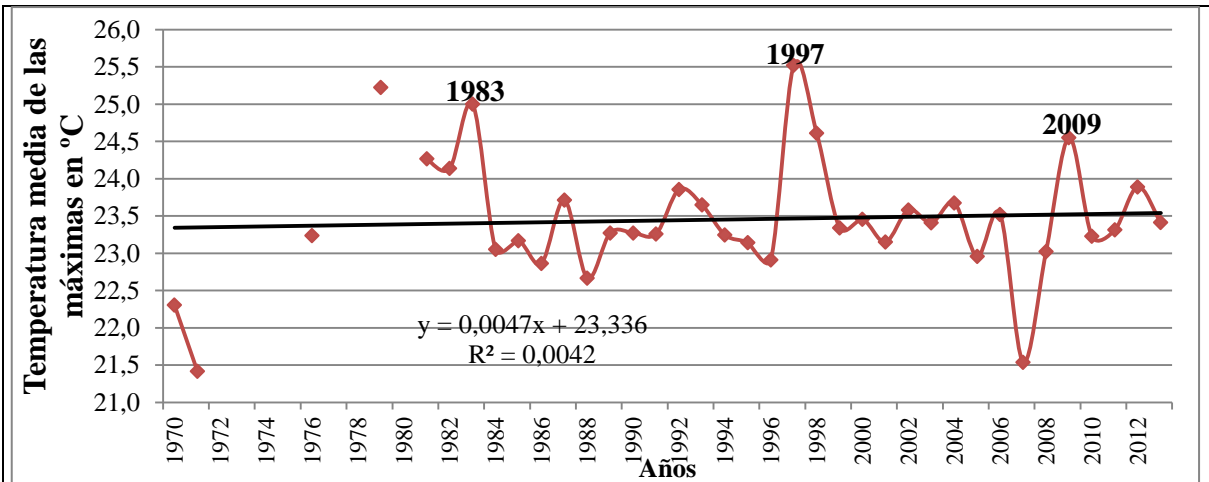


Gráfico 8. Temperatura Máxima Estación Azapa

Máximas: Han tenido un aumento discreto desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0,05°C en 10 años y 0,14°C en treinta años. Las temperaturas máximas durante el treintenio estudiado corresponden a los años 1979 y 1997 donde las máximas llegaron a los 25, 2°C y 25,5°C respectivamente. La temperatura media máxima para el período en estudio es de 23,5°C, y la tendencia muestra que las temperaturas máximas continúan aumentando pero de manera mesurada.

b) Codpa

Estación ubicada a 114 kilómetros al Sureste de Arica, en el corazón de la quebrada de Camarones a 1870 msnm. Esta estación representa uno de los mejores ejemplos en cuanto al aumento de las temperaturas máximas tal como lo expone el IPCC 2013, donde la temperatura media global aumentó en 0,85°C en los últimos 30 años; y donde las mínimas muestran una disminución en promedio de -0,5°C; acentuando aún más las condiciones de continentalidad y oscilación térmica.

Con respecto, a las pendientes tanto de la temperatura mínima y máxima, muestran una acentuada disminución y aumento de éstas, durante los 44 años en estudio, siendo el período entre 1970 y 1990 los años donde más se pronuncian estos cambios; destacando las temperaturas máximas con alzas pronunciadas que superan los 2°C de diferencia (ver gráficos 9 y 10.)

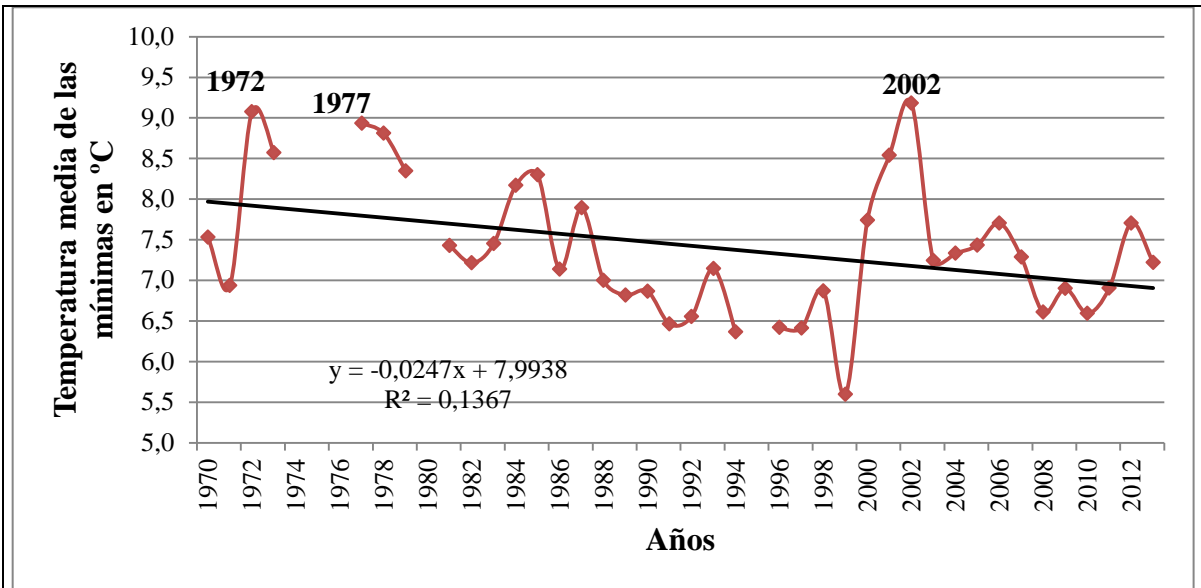


Gráfico 9. Temperaturas Mínimas Estación Codpa

Mínimas: Han tenido una disminución desde 1970 al 2013, correspondiendo a $-0,4^{\circ}\text{C}$ en 10 años y $-0,74^{\circ}\text{C}$ en treinta años. La temperatura media anual más fría en la estación corresponde al año 1999 con $5,6^{\circ}\text{C}$ y la más alta corresponde al año 2002 con $9,2^{\circ}\text{C}$. La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los $7,4^{\circ}\text{C}$, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas tienden a la baja.

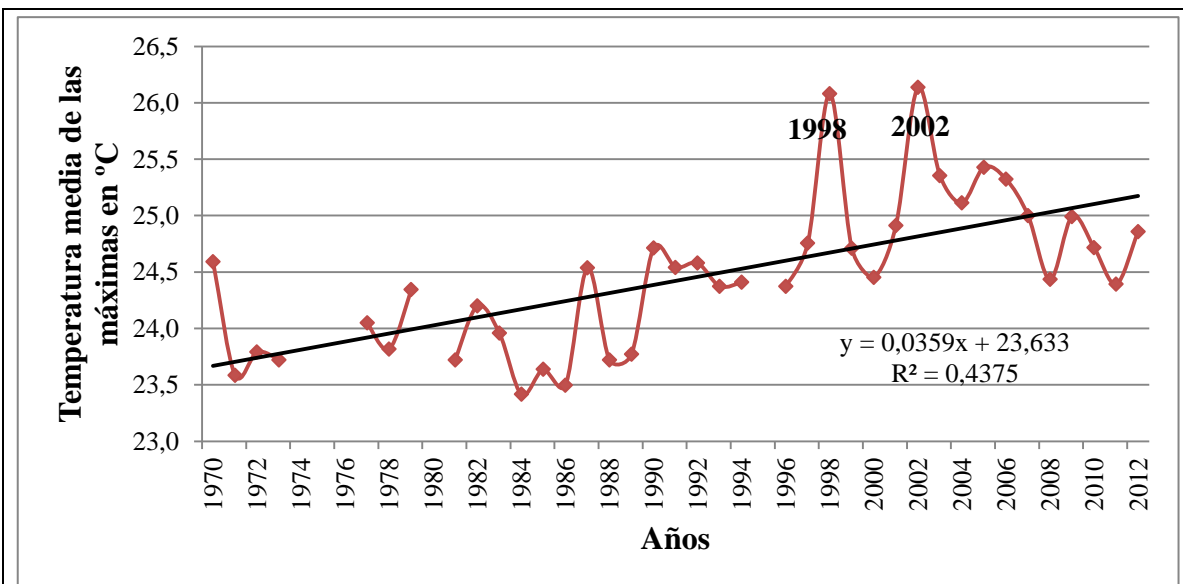


Gráfico 10. Temperatura Máxima Estación Codpa

Máximas: Han tenido un aumento importante desde 1970 al 2013, correspondiendo a $0,36^{\circ}\text{C}$ en 10 años y $1,08^{\circ}\text{C}$ en treinta años, siendo uno de los más altos. Las temperaturas máximas durante el treintenio estudiado corresponden a los años 1998 y 2002 donde las máximas llegaron a los $26,1^{\circ}\text{C}$. La temperatura media máxima para el período en estudio es de $24,5^{\circ}\text{C}$, y la tendencia muestra que las temperaturas máximas continúan aumentando a un ritmo acelerado.

4.1.1.3. Estaciones Pre-altiplánica y Altiplánicas

Corresponden a las estaciones ubicadas en el pre-altiplano y altiplano del área de estudio, abarcando parte de la cuenca del Loa en su fracción media y alta, con las estaciones de Parshall n°2 y Calama, estación ubicada en el Aeródromo El Loa.

Esta estaciones pertenecen a la DGA (Parshall n°2) y DMC (El Loa), y aunque presentan algunos vacíos en sus datos, permitieron caracterizar el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas en el área central del estudio, el Altiplano Andino. Si bien es cierto no entregaron una visión más completa de lo que sucede en esta zona a lo largo de las tres regiones que lo comprenden, estas estaciones describieron lo que ha sucedido con las temperaturas en estos cuarenta años en estudio, mostrando una gran oscilación térmica y un aumento paulatino de las temperaturas máximas.

a) Parshall n°2

Estación meteorológica ubicada a 73 kilómetros al Noreste de la ciudad de Calama, a los faldeos del Volcán San Pedro a 3318 msnm. Esta estación presenta un comportamiento bastante peculiar ya que sus temperaturas máximas aumentan en 0,31°C en los cuarenta años en estudio, pero sus temperaturas mínimas presentan una disminución importante de -2,2°C en el período 1970 – 2013 mostrando una baja abrupta en su pendiente lo que se clarifica en los datos (ver gráficos 11 y 12); tal como se muestra a continuación:

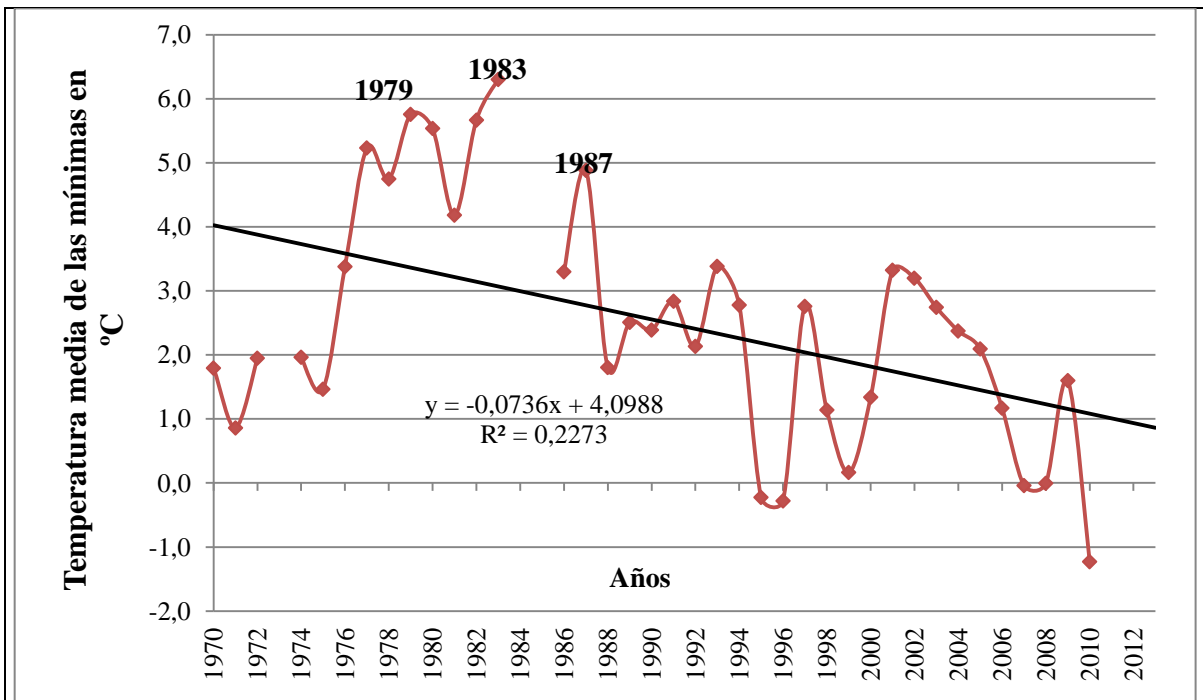


Gráfico 11. Temperatura mínima Estación Parshall

Mínimas: Han tenido una disminución importante desde 1970 al 2013, correspondiendo a -0,7°C en 10 años y -2,2°C en treinta años, siendo esta la estación que mayor disminución en las temperaturas medias mínimas presenta en el área de estudio. La temperatura media anual más fría en la estación corresponde al año 1996 con -1,23°C y la más alta corresponde al año 1983 con 6,2°C. La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los 2,5°C, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas tienden a la baja.

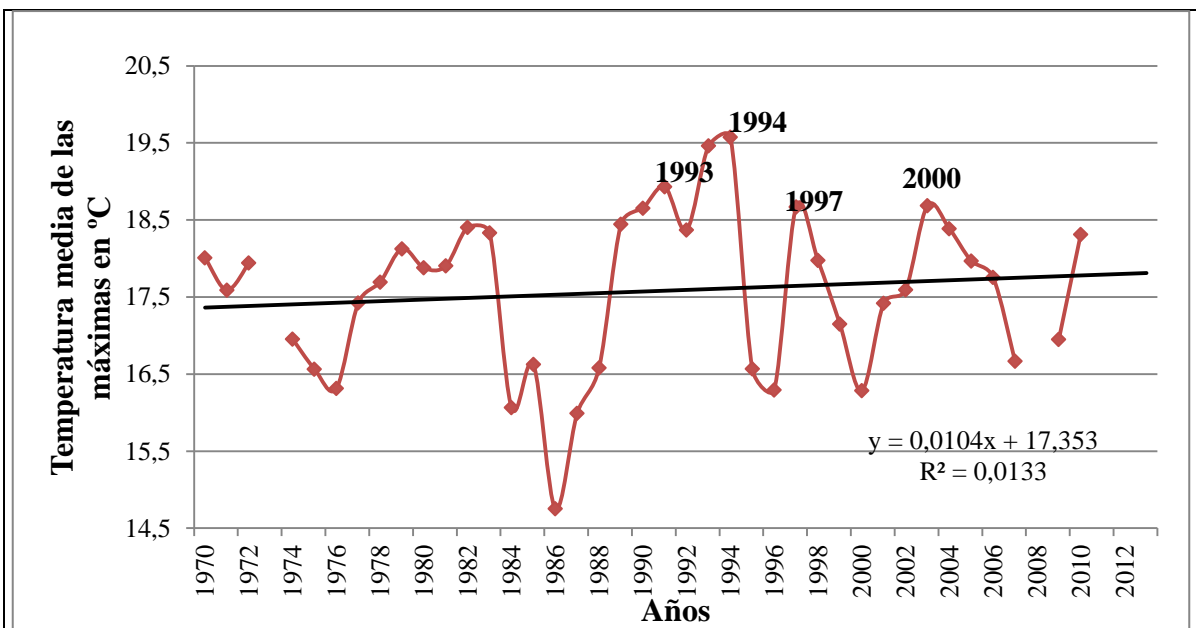


Gráfico 12. Temperatura Máxima Estación Parshall

Máximas: Han tenido un leve aumento desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0, 1°C en 10 años y 0,3°C en treinta años. Las temperaturas máximas durante el treintenio estudiado corresponden a los años 1994 con 19,6°C y 1997 con 18,7°C. La temperatura media máxima para el período en estudio es de 17,6°C, y la tendencia muestra que las temperaturas máximas continuaran aumentando.

b) El Loa

Estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto El Loa, a 5 km al Sureste de la ciudad de Calama a 2293 msnm. Esta estación junto a Codpa son las que presentaron las variaciones más altas en cuanto a temperaturas medias máximas se refiere, bordeando los 1,52°C en un período de 40 años; superando lo estipulado por el IPCC 2013, siendo esta estación la única que presenta un aumento sostenido en cuanto a la pendiente, marcando una clara tendencia a la alza en las temperaturas medias mínimas y máximas, tal como se observa a continuación:

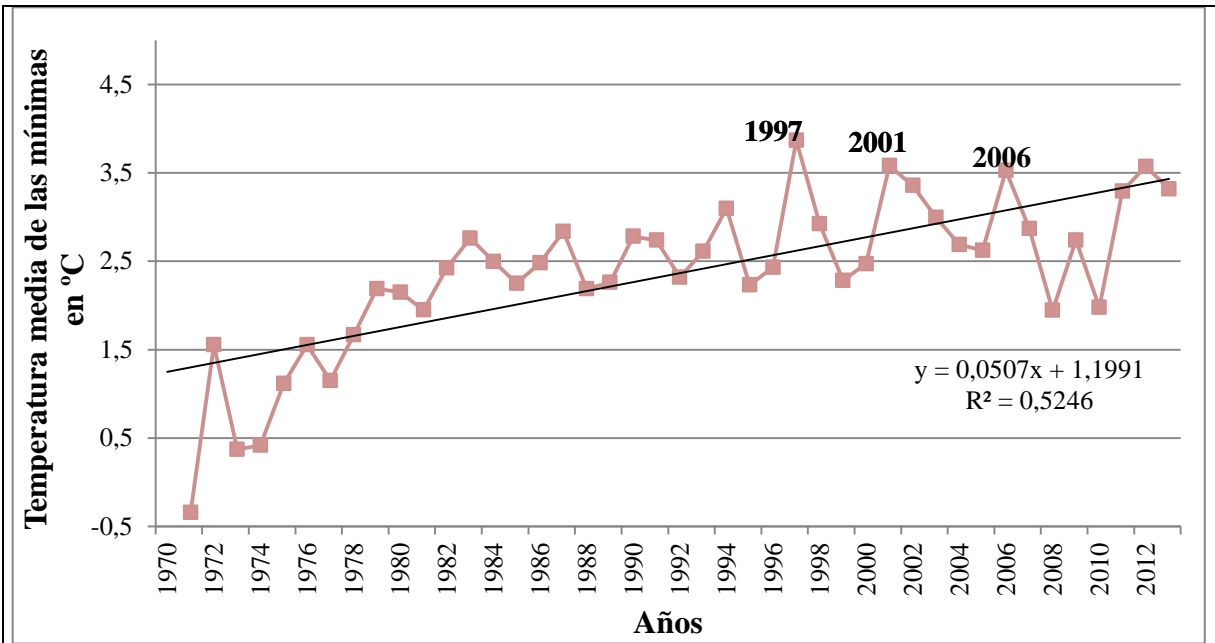


Gráfico 13. Temperatura Mínima Estación El Loa

Mínimas: Han tenido una aumento importante desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0,507°C en 10 años y 1,521°C en treinta años. La temperatura media anual más fría en la estación corresponde al año 1971 con -0,3°C y la más alta corresponde al año 2008 con 1,94°C. La temperatura media mínima para el período en estudio se ubica en los 2,4°C, y la tendencia muestra que las temperaturas mínimas tienden a la alza.

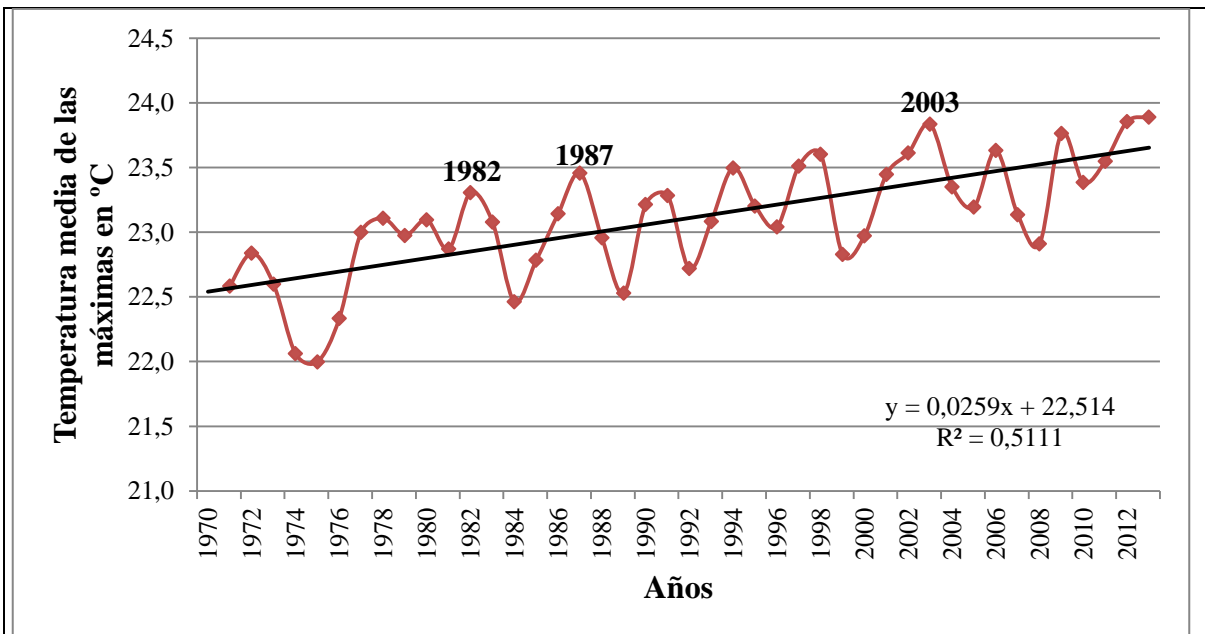


Gráfico 14. Temperatura Máxima Estación El Loa

Máximas: Han tenido un leve aumento desde 1970 al 2013, correspondiendo a 0,26 en 10 años y 0,78°C en treinta años. Las temperaturas máximas durante el treintenio estudiado corresponden al año 2013 con 23,9°C aumentando desde 1970 al 2103 0,5°C. La temperatura media máxima para el período en estudio es de 23,1°C y todo indica que las temperaturas seguirán aumentando,

Síntesis de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas en el norte grande de Chile

El análisis de cada una de las estaciones y sus respectivas gráficas, muestra un importante aumento en las temperaturas máximas en el altiplano del norte grande y una leve disminución de éstas en la costa, concordando con lo expuesto por Vuille et al. (2014) donde se destaca que la costa andina ubicada entre los 17° S y los 37° S presenta dicho enfriamiento en los últimos 20 a 30 años; mientras que en las zonas más altas de Los Andes se ha visto un aumento de las temperaturas continuado.

Acotando el análisis por zonas, el estudio evidenció que las temperaturas para la costa del norte grande de Chile entre los años 1970 – 1990 presentaron un aumento sostenido de las temperaturas, para luego pasar a una fase de calentamiento debilitado, donde se hace presente el *hiatus* o la desaceleración del calentamiento global de la temperatura. (Vuille et.al 2014) Este fenómeno no se ha presentado en ningún otro lugar del planeta, y se le atribuye a los cambios en la variabilidad decadal del pacífico y a la intensificación del anticiclón del pacífico sur, lo que trajo consigo un aumento de las surgencias, lo que ayudó a enfriar ésta zona.

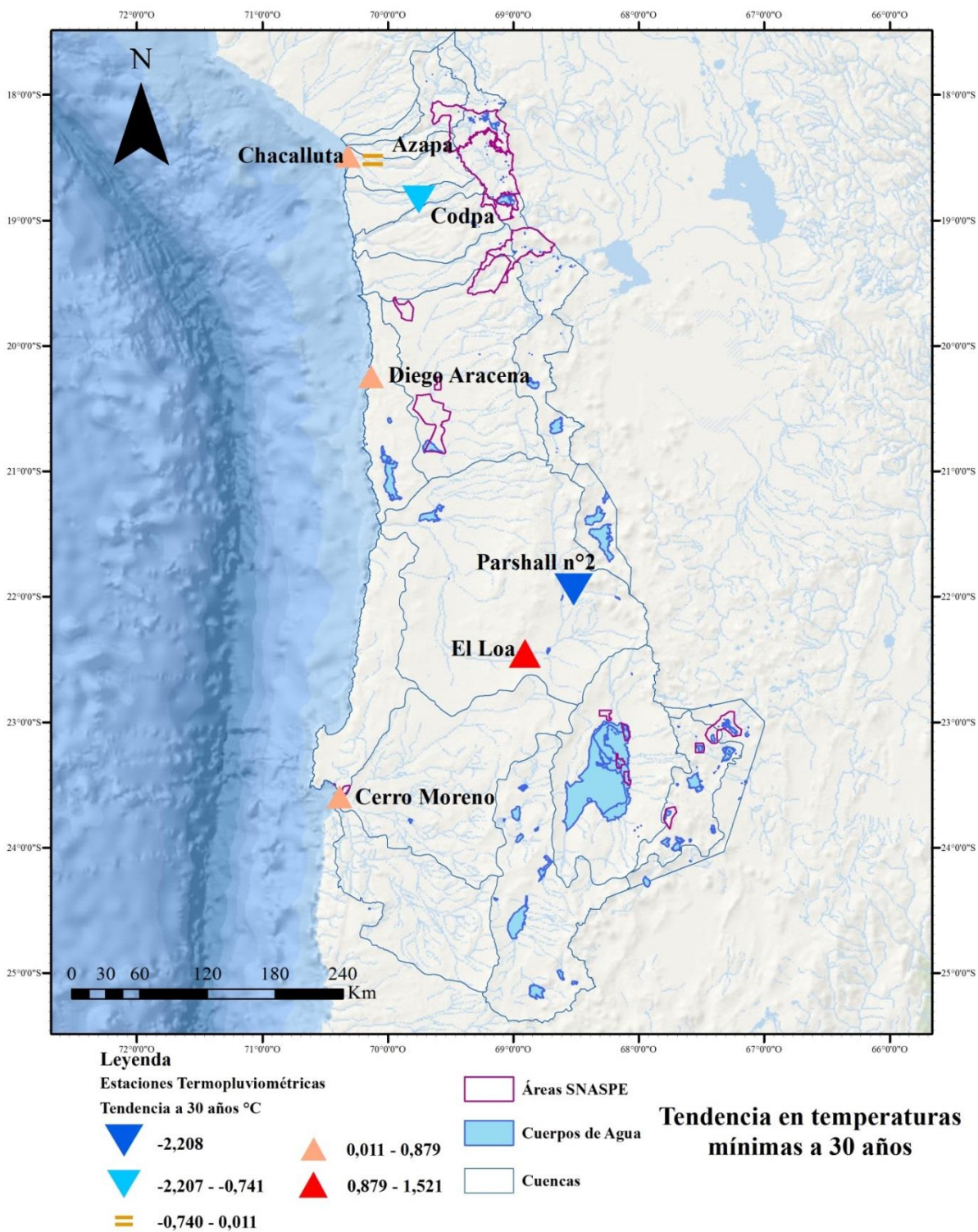
Sin embargo, este enfriamiento no se refleja de la misma forma en los andes ya que parece ser altamente dependiente de la altitud, debido a que durante los años analizados por Vuille, las temperaturas en las estaciones por sobre los 2000 de altitud, mantienen una clara tendencia al aumento de estas, siendo ratificado con la pérdida constante de la criosfera Andina (Vuille et al. 2014). Del trabajo de Vuille se desprende que este aumento en las temperaturas en la zona Andina, no se puede atribuir en su totalidad al cambio de fase negativa a positiva de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), ni a la temperatura superficial del mar (SST); sino que hay que considerar en su mayoría la intervención del ser humano en la alteración de los ecosistemas.

En la figura 22 se pueden apreciar las estaciones y su distribución en el área de estudio; las que presentan mayores disminuciones en cuanto a su temperatura mínima son de color azul, mientras que las que no presentaron variaciones significativas se encuentran en tonos celestes.

Tabla 11. Tabla resumen Temperatura Mínima

Estación	Tendencia decadal	Tendencia a Treinta años	Coefficiente de correlación	Número de datos	p_valor	Porcentaje de significancia
Chacalluta	0,293	0,879	0,456	44	0,001	99,8%
Azapa	-0,061	-0,183	0,064	39	0,979	2,0%
Codpa	-0,247	-0,741	0,369	39	0,020	97,9%
Diego Aracena	0,103	0,309	0,199	44	0,195	80,5%
Parshall	-0,736	-2,208	0,476	38	0,002	99,8%
El Loa	0,507	1,521	0,724	43	0,000	100,0%
Cerro Moreno	0,127	0,381	0,250	44	0,102	89,8%

Figura 22. Tendencia en temperaturas mínimas a 30 años.

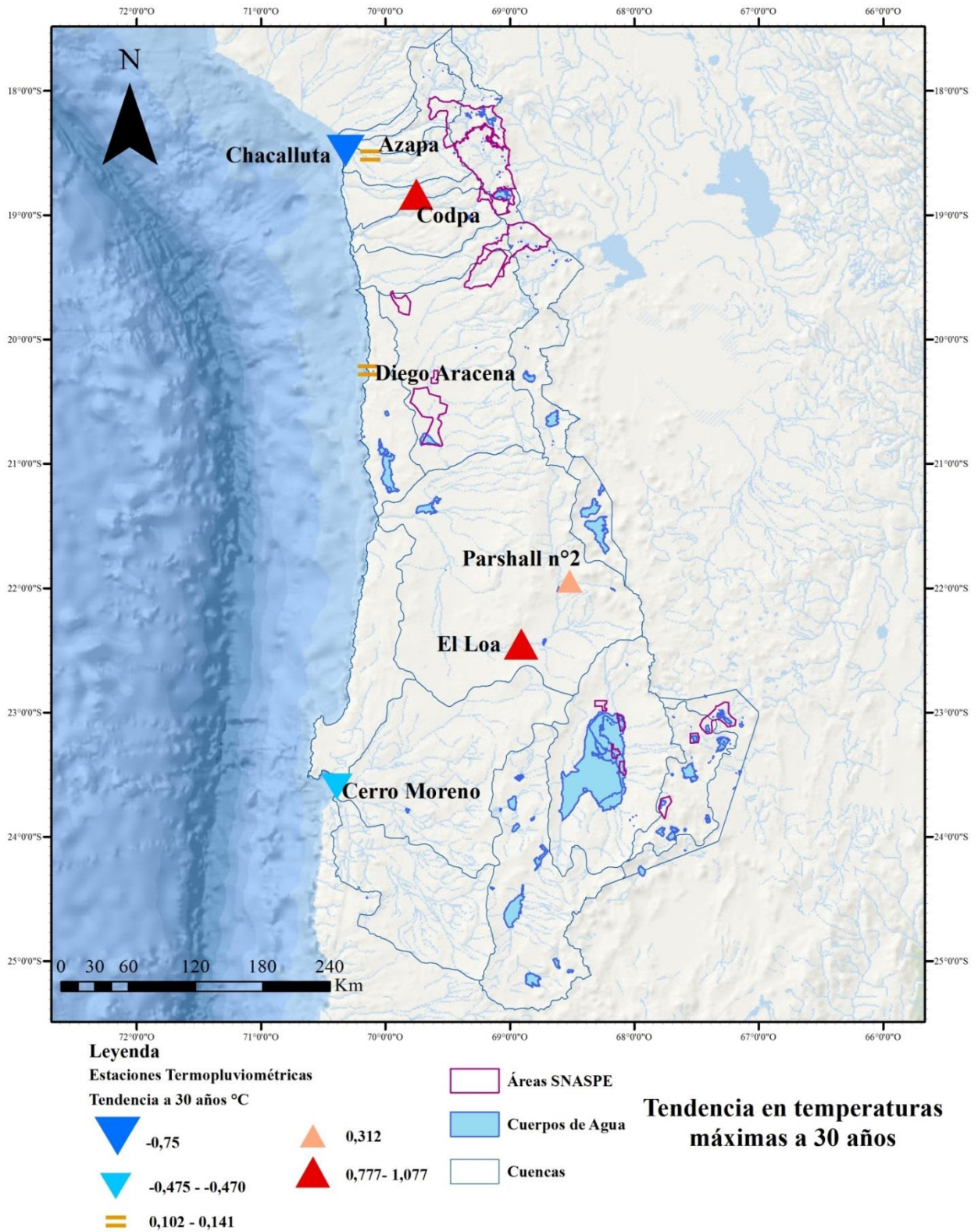


En cuanto a las temperaturas máximas la tabla 13 muestra los cambios que presentó en los 44 años de estudio, presentando aumentos en las estaciones ubicadas en valles y quebradas; y disminuciones en 2 de las tres estaciones costeras analizada. Para tener una mayor visualización espacial, en la figura 23 se puede ver la distribución geográfica de las estaciones, donde las estaciones con mayores aumento están destacadas con un círculo de color rojo, mientras que las presentaron disminuciones se presentan con tonos rosa.

Tabla 12. Tabla resumen Temperaturas máximas

Estación	Tendencia decadal	Tendencia a Treinta años	Coefficiente de correlación	Número de datos	p_valor	Porcentaje
Chacalluta	-0,25	-0,76	0,3838	44	0,010	99,0%
Azapa	0,05	0,14	0,06	37	0,703	29,7%
Codpa	0,36	1,08	0,66	39	0,000	100,0%
Diego Aracena	0,03	0,10	0,06	44	0,680	32,0%
Parshall	0,10	0,31	0,12	39	0,485	51,5%
El Loa	0,26	0,78	0,71	43	0,000	100,0%
Cerro Moreno	-0,16	-0,47	0,34	44	0,023	97,7%

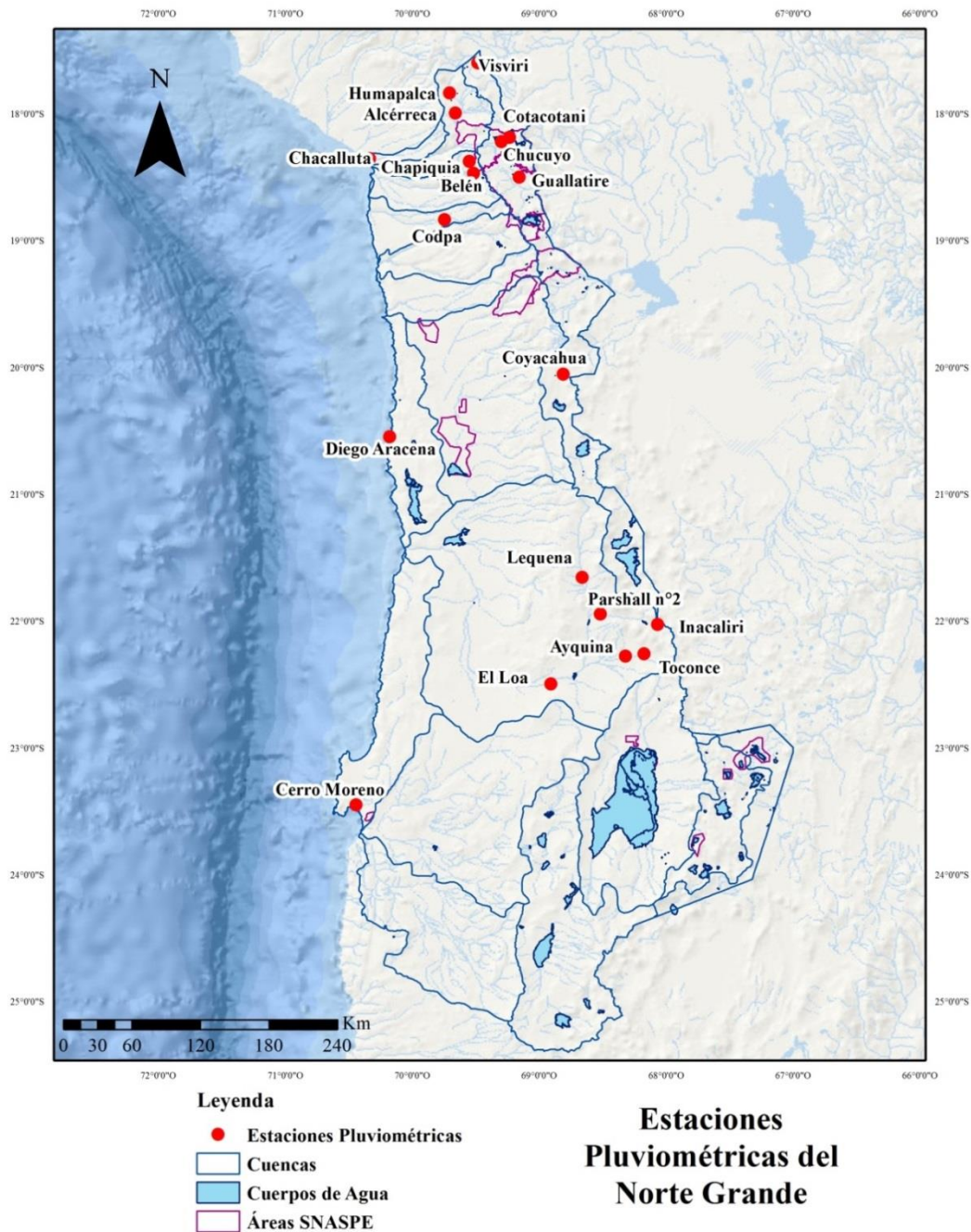
Figura 23. Tendencias en Temperaturas máximas a 30 años



4.1.2. Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile

Para caracterizar las precipitaciones y su comportamiento en el altiplano chileno se procedió a ordenar las estaciones de norte a sur según la cantidad de datos recolectados para el treintenio en estudio quedando distribuidas de la siguiente manera y entregando los siguientes resultados:

Figura 24. Estaciones pluviométricas del norte grande y altiplano



Para este análisis se utilizaron los valores de las precipitaciones caídas en los meses estivales correspondientes a diciembre, enero, febrero y marzo, ya que es en este período donde se presentan los mayores montos de agua caída en el área de estudio.

4.1.2.1. Estaciones Costeras

Corresponden a aquellas estaciones meteorológicas ubicadas en los aeródromos de las principales ciudades del norte grande, siendo estas estaciones las que proporcionan las series de datos más completas para el área de estudio.

a) Chacalluta

Estación costera ubicada a 18 kilómetros al norte de la ciudad de Arica, presenta un leve aumento en los montos de agua caída durante los cuarenta años en estudio. Si bien es cierto, los montos precipitados no alcanzan a superar los 5 mm de agua caída, estos son considerados aumentos importantes para la zona donde generalmente precipitaban 1 a 2 mm anuales.

En la gráfica es posible apreciar un aumento en cuanto a la pendiente, marcando un alza que ha sido sostenida durante los años analizados, siendo desde 1986 a 1997 el período donde esta alza es más representativa.

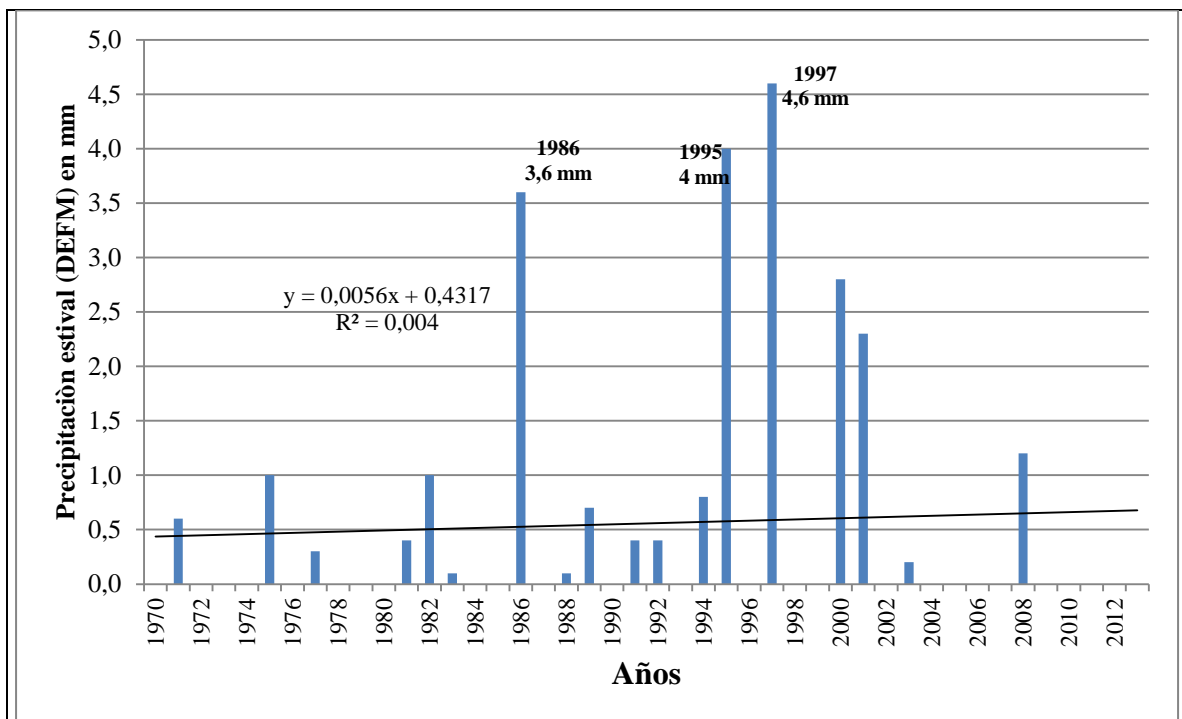


Gráfico 15. Precipitación Estación Chacalluta

Chacalluta ha presentado un leve aumento en sus precipitaciones durante los cuarenta años en estudio teniendo un aumento de 0,056 mm en 10 años y de 0,168 mm en 30 años. Los máximos montos de agua caída corresponden a los años 1986 con 3,6 mm, 1995 con 4 mm y 1997 con 4,6 mm de agua caída en los meses estivales.

b) Diego Aracena

Estación costera ubicada a 45 kilómetros al sur de la ciudad de Iquique, presenta un leve aumento en los montos de agua caída durante los cuarenta años en estudio, registrando sus mayores montos de agua caída en los años 1993 con 1,8 mm y el 2012 con 0,3 mm. Es una de las estaciones meteorológicas que presenta los montos más bajos de agua caída en los meses estivales en cuarenta años analizados.

En la gráfica, se puede apreciar como la pendiente marca un aumento en las precipitaciones, siendo más pronunciado en los años 90 y manteniéndose hasta el 2012, coincidiendo con los años donde precipitó con los mayores montos.

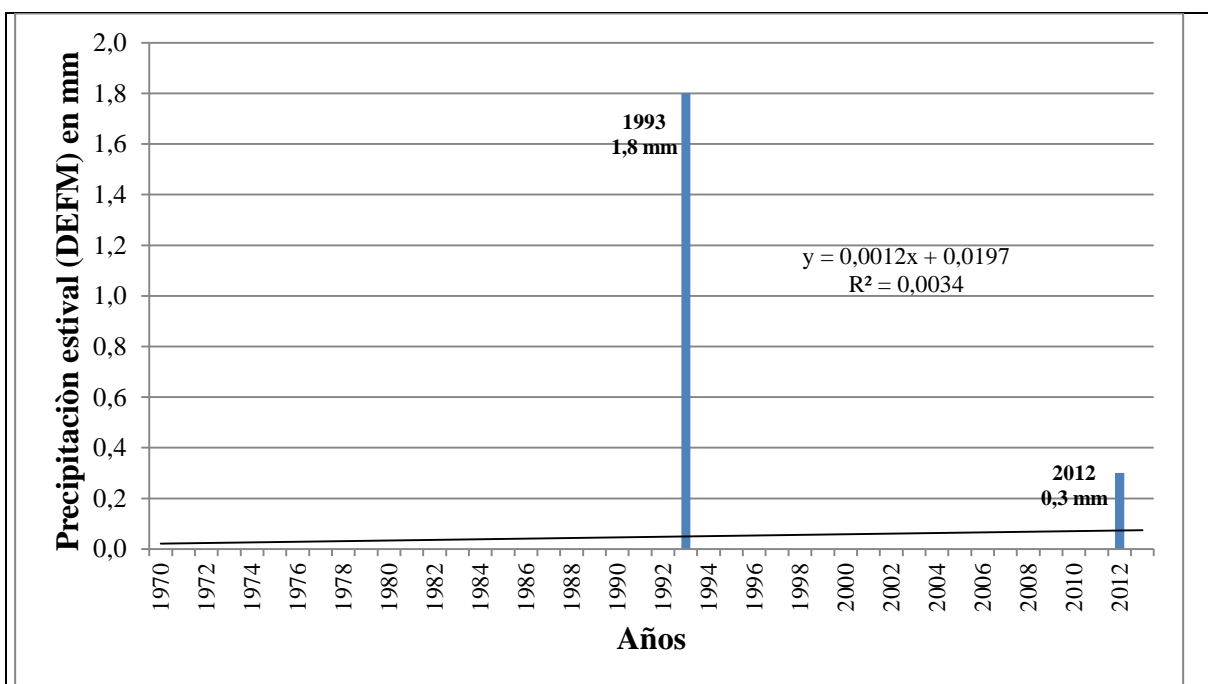


Gráfico 16. Precipitación Estación Diego Aracena

Diego Aracena es una de las estaciones que presenta los montos más bajos en precipitaciones en los cuarenta años en estudio. Esta estación costera presenta un aumento discreto en sus montos de agua caída registrando 0,012 mm para 10 años y de 0,036 mm en 30 años.

c) Cerro Moreno

Estación costera ubicada a 26,6 kilómetros al norte de Antofagasta, presenta un aumento importante en los montos de agua caída durante el período 1970 – 2013. Dentro de las estaciones costeras, es una de las que presenta el mayor crecimiento en cuanto a la pendiente, mostrando un aumento sostenido durante todo el período analizado.

En la gráfica, se aprecia un mayor aumento en cuanto a la pendiente durante los años de 1970 a 1979, siendo esta alza sostenida hasta finales del 2013.

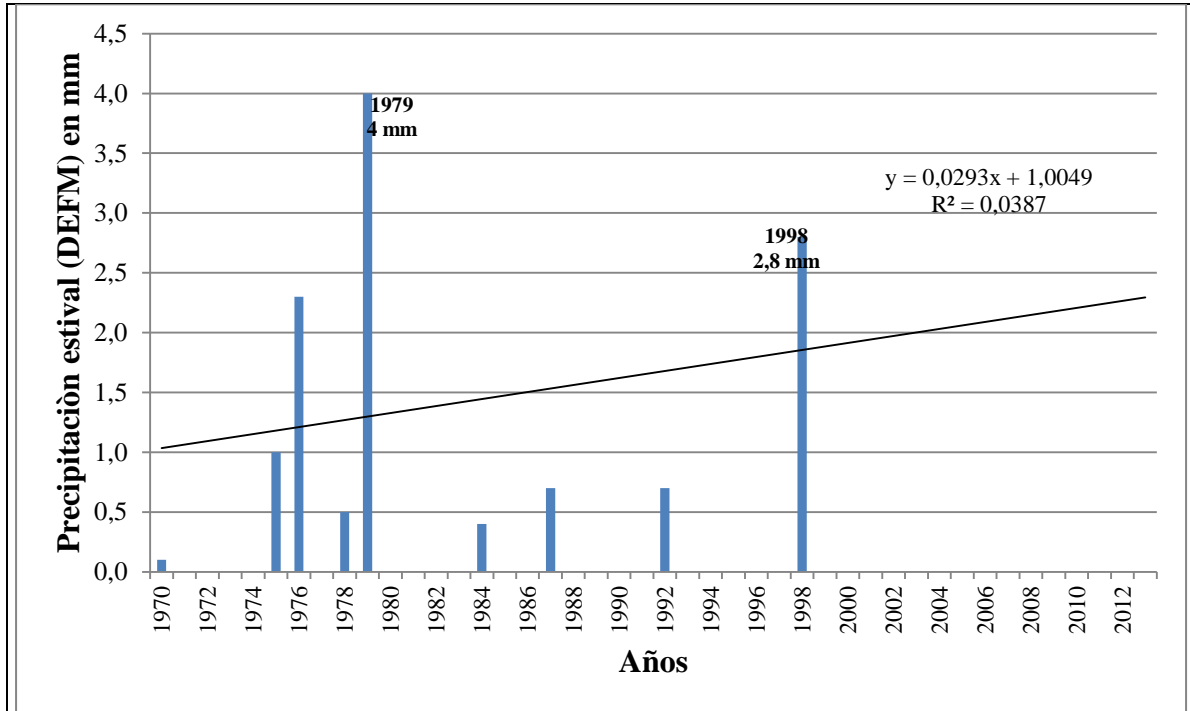


Gráfico 17. Precipitación Estación Cerro Moreno

Cerro Moreno presenta un aumento en sus precipitaciones en los 40 años analizados. Si bien es cierto no es una de las estaciones costeras donde precipita con mayor frecuencia, como es el caso de Chacalluta, ésta estación presenta un aumento de casi dos milímetros en 40 años, siendo para la zona, un alza considerable.

4.1.2.2. Estaciones de Valles y Quebradas

Corresponden a aquellas estaciones ubicadas en sectores de valles y quebradas bajo los 3000 msnm. En esta investigación y dentro del análisis de las tendencias en precipitaciones la única estación que cumplía con estas características y con un muestreo superior al 90% de los datos capturados es la estación de Codpa.

a) Codpa

Estación Meteorológica ubicada a 114 kilómetros al sureste de Arica, en el corazón de la cuenca de Camarones a 1870 msnm. Ésta es una de las estaciones que durante los cuarenta años analizados presenta uno de los valores más bajos en cuanto a agua caída teniendo como máximo 52,5 mm en el año 2000, y junto a ello los mínimos en la estación

corresponden a 0,2 mm anuales en 1998. Hay que destacar que esta estación no contaba con todos los datos para el período en estudio por lo presenta algunos vacíos.

En la gráfica, es posible apreciar un aumento en cuanto a la pendiente, marcando una tendencia al alza, la que ha sido sostenida desde 1970 hasta el 2013, aunque con una importante variabilidad en cuanto a los montos por año.

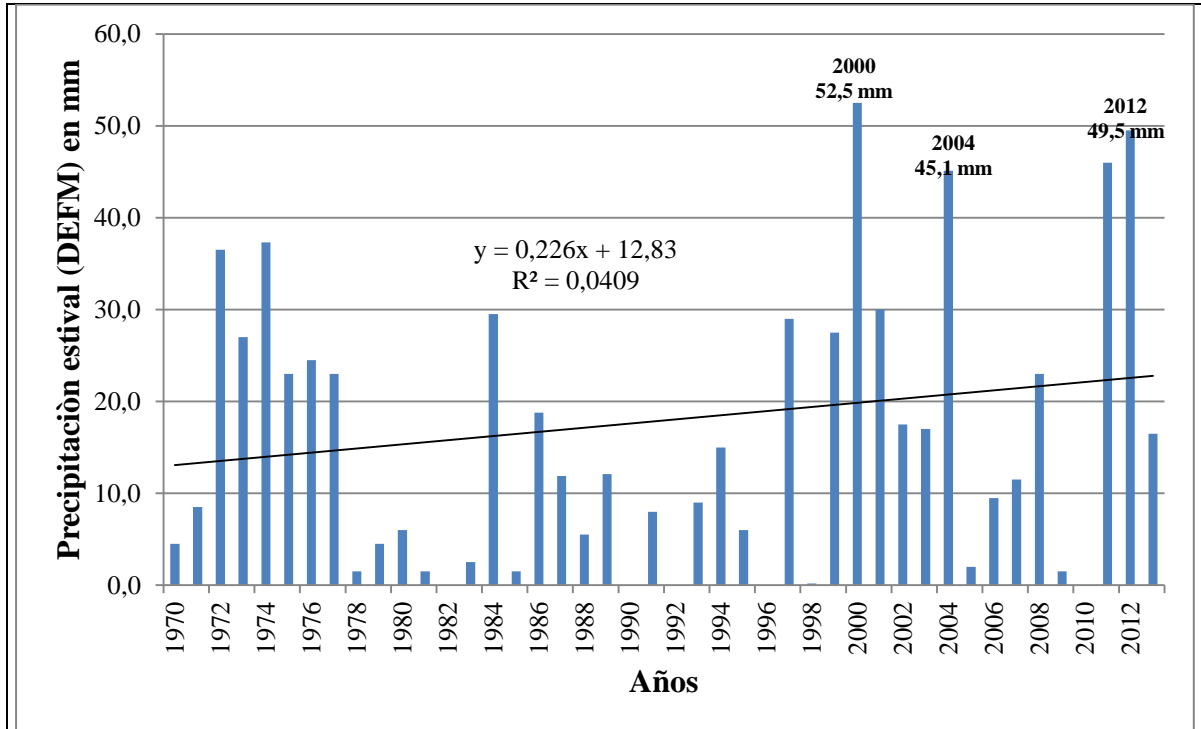


Gráfico 18. Precipitación Estación Codpa

Codpa presenta un comportamiento irregular en la precipitación teniendo períodos de abundancia y sequía. Durante los cuarenta años analizados se evidencia un aumento leve de las precipitaciones para un período de 10 años de 2,3 mm y para 30 años de 6,8 mm.

4.1.2.3. Estaciones Prealtiplánicas

Estas estaciones corresponden a las ubicadas entre los 2500 y los 4000 msnm. Estas estaciones registran precipitaciones sobre los 100 mm las que aumentan mientras se sube en altura y disminuyen de norte a sur. Las nueve estaciones analizadas entregaron información de las precipitaciones y sus tendencias, alcanzando un 95% de recolección de datos, testimonios importantísimos para la caracterización de las tendencias este sector del área de estudio.

Información a destacar es que de las ocho estaciones seleccionadas sólo una presenta un aumento de las precipitaciones en los cuarenta años analizados, mientras que las otras siete mostraron disminuciones a destacar en los montos de agua caída en el período en estudio, siendo la estación Lequena la que presenta la disminución más importante de todas las estaciones analizadas en este estudio.

A continuación, se analizan las ocho estaciones ubicadas en el Prealtiplano ordenadas de norte a sur:

a) Humapalca

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca del río Lluta a 3980 msnm. Administrativamente se encuentra en la región de Arica y Parinacota. Esta estación presenta un descenso en sus montos de agua caída durante el período 1970 – 2013, siendo de 25,8 mm en 10 años y de 77, 3 mm en 30 años. La media del período en cuestión es de 267,9 mm demostrando su descenso en comparación a los 300 mm que marcaban la media en 1970, tal como lo muestra la pendiente en la siguiente gráfica:

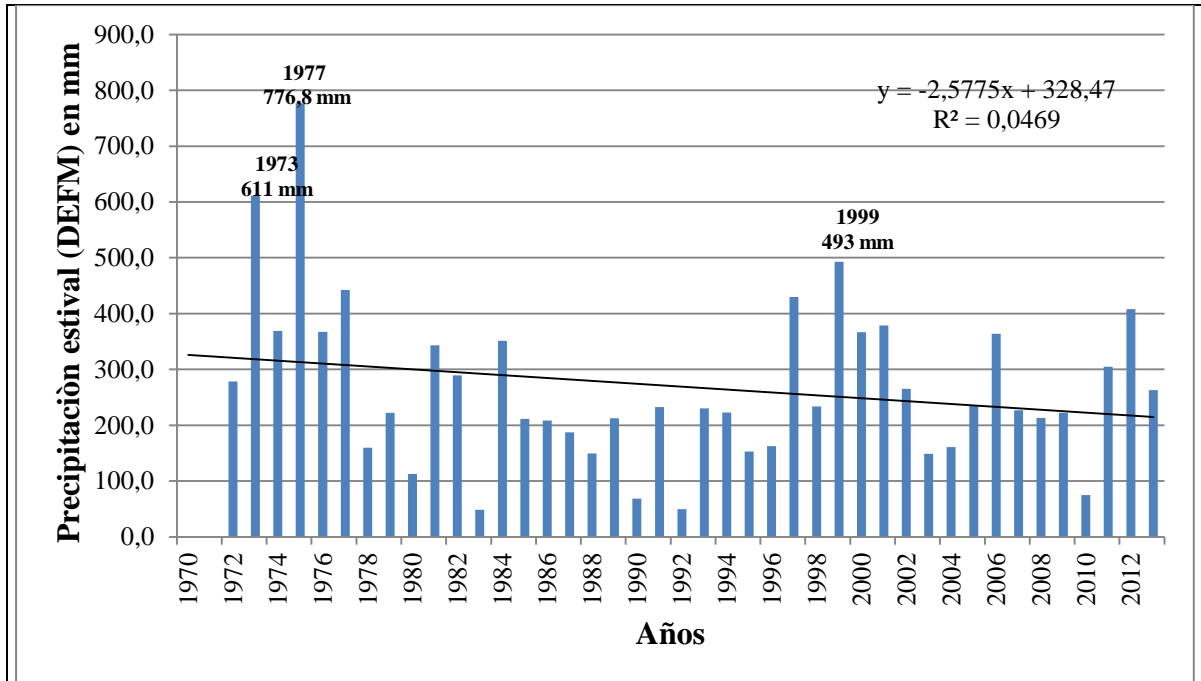


Gráfico 19. Precipitación Estación Humapalca

Humapalca presenta un descenso importante en los montos de agua caída en el treintenio en estudio. Los años que más precipitación se registró corresponden a 1976 con 776, 8 mm, 1973 con 611 mm y 493 mm en 1999. En la gráfica se puede apreciar la variabilidad de las precipitaciones en los últimos años donde se pasa de 400 mm en 2012 a 200 mm en 2013.

b) Alcérreca

Estación Meteorológica ubicada a 3990 msnm. Al igual que Humapalca pertenecen administrativamente a la región de Arica y Parinacota y forman parte de la misma cuenca del río Lluta. Esta estación presenta un descenso en sus porcentajes de agua caída durante los treinta años en estudio, siendo de 7,5 mm en 10 años y de 22,4 mm en 30 años, quedando de manifiesto en el declive de la pendiente en la gráfica, durante los 44 años analizados. La media del período en cuestión es de 192,6 evidenciando la disminución de la precipitación en la parte alta de la cuenca del río.

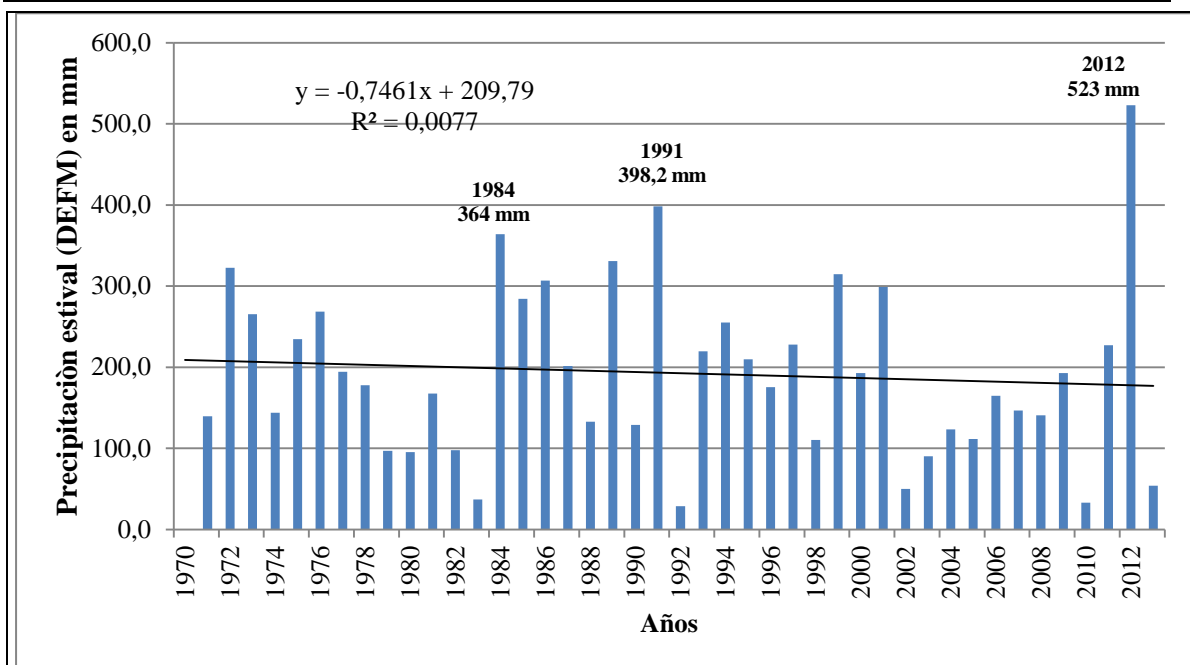


Gráfico 20. Precipitación Estación Alcérreca

Alcérreca ha tenido un comportamiento diferente al de su compañera de cuenca, ya que durante el período en estudio y a pesar que ambas presentan bajas en cuanto al agua caída, en esta estación la disminución es menor, pasando de una media en 1970 por sobre los 200 mm de agua caída a 190 mm de agua caída para el 2013. Los máximos de agua caída en la estación corresponden al año 2012 con 523 mm y el mínimo corresponde al año 2010 con 33 mm de agua caída.

c) **Chapiquia**

Estación Meteorológica ubicada a 3350 msnm en la región de Arica y Parinacota. Perteneciente a la cuenca de Camarones, presenta una tendencia a la baja en sus precipitaciones donde como indica la pendiente en la gráfica, estas van disminuyendo entre 1970 y 2013. En estos años en estudio, fue 1977 el año que más agua caída se registró, alcanzando los 390,5 mm, mientras que el monto más bajo que se registró fue en el año 1992 donde sólo cayeron 9,9 mm anuales.

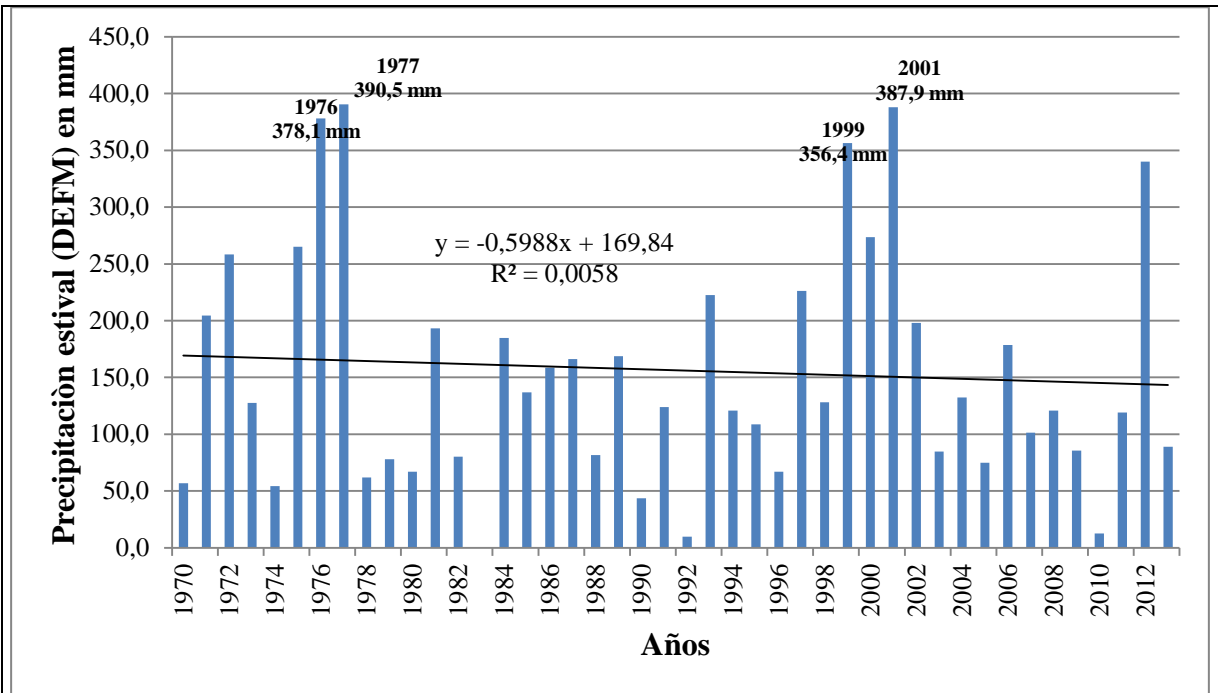


Gráfico 21. Precipitación Estación Chapiquia

Chapiquia presenta una tendencia a la baja en sus precipitaciones. Para el período 1970 – 2013 las precipitaciones disminuyeron en 6mm en 10 años y 18 mm en 30 años. Si bien es cierto no representan una disminución abrupta de las precipitaciones, es importante a destacar, ya que son estas precipitaciones estivales las que sirven para la recarga de acuíferos y el aumento en la productividad de forraje y alimento en las vegas y bofedales prealtiplánicos.

d) Belén

Estación Meteorológica ubicada a 3240 msnm en la cuenca del río San José, en la región de Arica y Parinacota. Esta estación es una de las pocas que presenta un leve aumento en sus montos de agua caída en los treinta años, aunque es levemente perceptible en la gráfica, este aumento es importante alcanzando los 3,8 mm en 10 años y de 11,5 mm en 30 años. Su emplazamiento en la parte alta de la cuenca del río San José, entrega datos interesantes de análisis sobre las crecidas y el comportamiento hídrico.

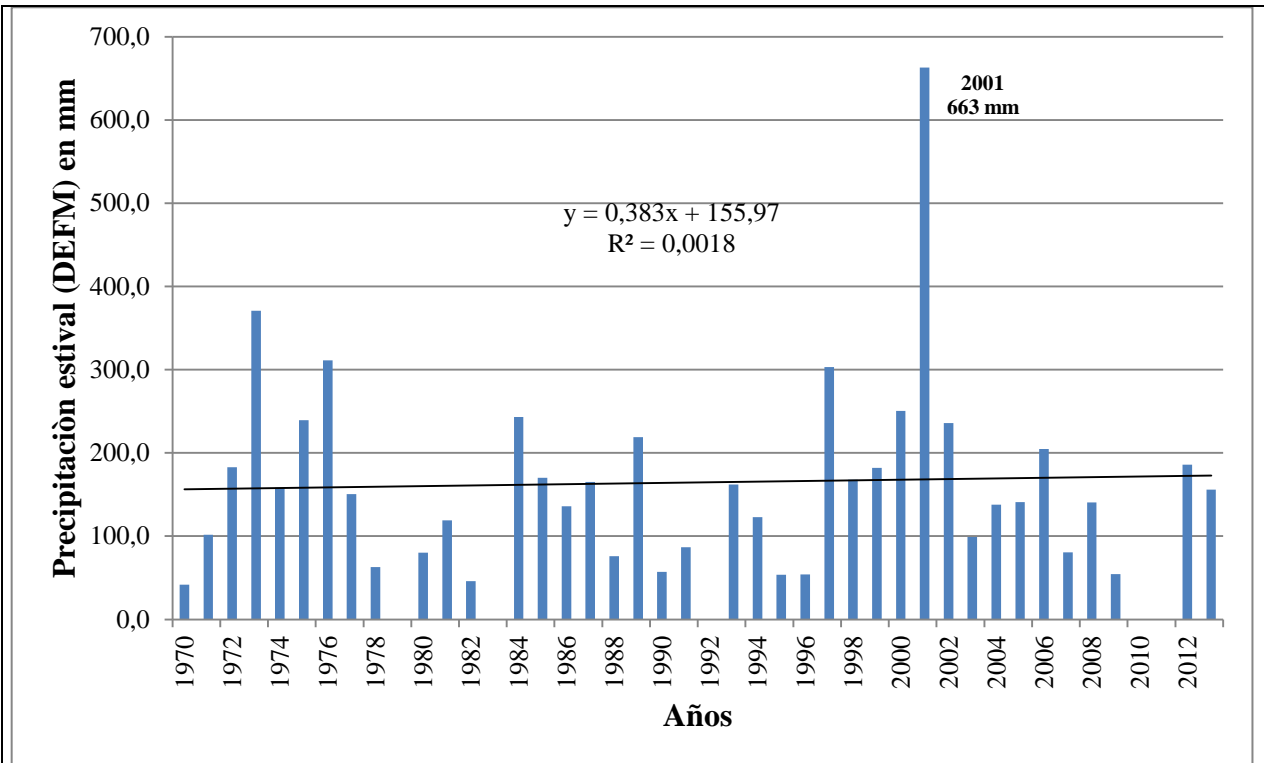


Gráfico 22. Precipitación Estación Belén

Belén presenta una leve crecida en los montos de agua caída durante los 30 años en estudio, pasando de un promedio de 142 mm durante los 15 años a 164,4 mm al finalizarlo. El máximo de agua caída durante el treintenio fue 663 en el 2001 y el mínimo corresponde al año 1970 con 41,7 mm.

e) Lequena

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca del río Loa a 3320 msnm. Pertenece administrativamente a la región de Antofagasta. Esta estación presenta una disminución acelerada de los montos de agua caída pasando de 44, 259 mm en 10 años a 132,77 mm en 30 años. Su ubicación en la parte alta de la cuenca del El Loa, explica el régimen de las precipitaciones en este tramo de la cuenca, y la importancia de éstas como aporte al caudal del río, lo llama la atención con respecto a su abrupto cambio en las precipitaciones haciendo alusión la variabilidad en las precipitaciones donde pasamos de 233,2 mm caída en 2012 a 7,9 mm de agua caída en el 2013.

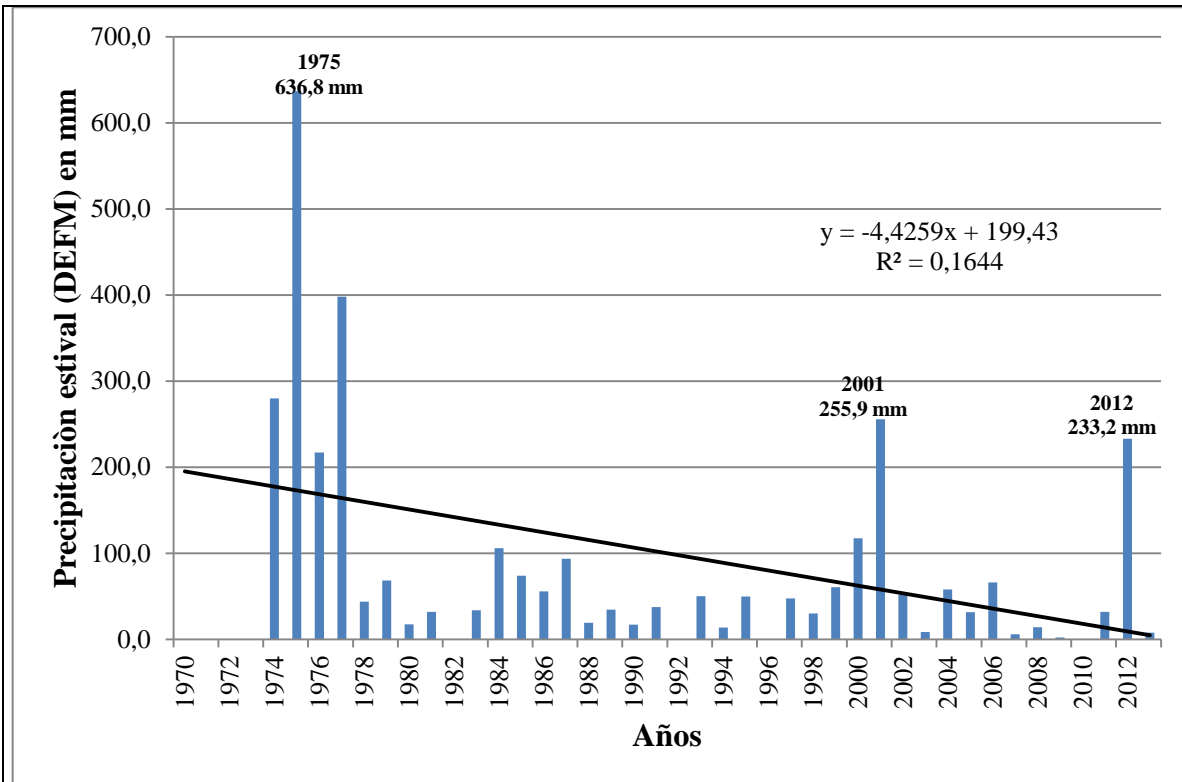


Gráfico 23. Precipitación Estación Lequena

Lequena presenta una disminución importante de sus montos de precipitación caída en el período 1970 – 2013 pasando un promedio de 117,3 mm los primeros 15 años, a 91,7 mm como promedio al finales del período en estudio. Lequena es la estación que presenta los cambios más drásticos analizados donde además de su disminución significativa, la variabilidad climática de un años a otro en agua caída, da una clara señal que el cambio climático está presente en el Altiplano

f) Parshall

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca del río Loa a 3318 msnm. Pertenece administrativamente a la región de Antofagasta. Al igual que la estación anterior, Parshall presenta una disminución leve en sus montos de precipitación pasando de una media para 15 años de 34,34 mm a un a media total del período de 30,97 mm.

Ubicada a 35 kilómetros al Sur de la estación de Lequena, cercano un tributario del río Loa, Parshall presenta una disminución de 1,45 mm en 10 años y de 4,37 mm para los 30 años en estudio, quedando graficado de la siguiente manera:

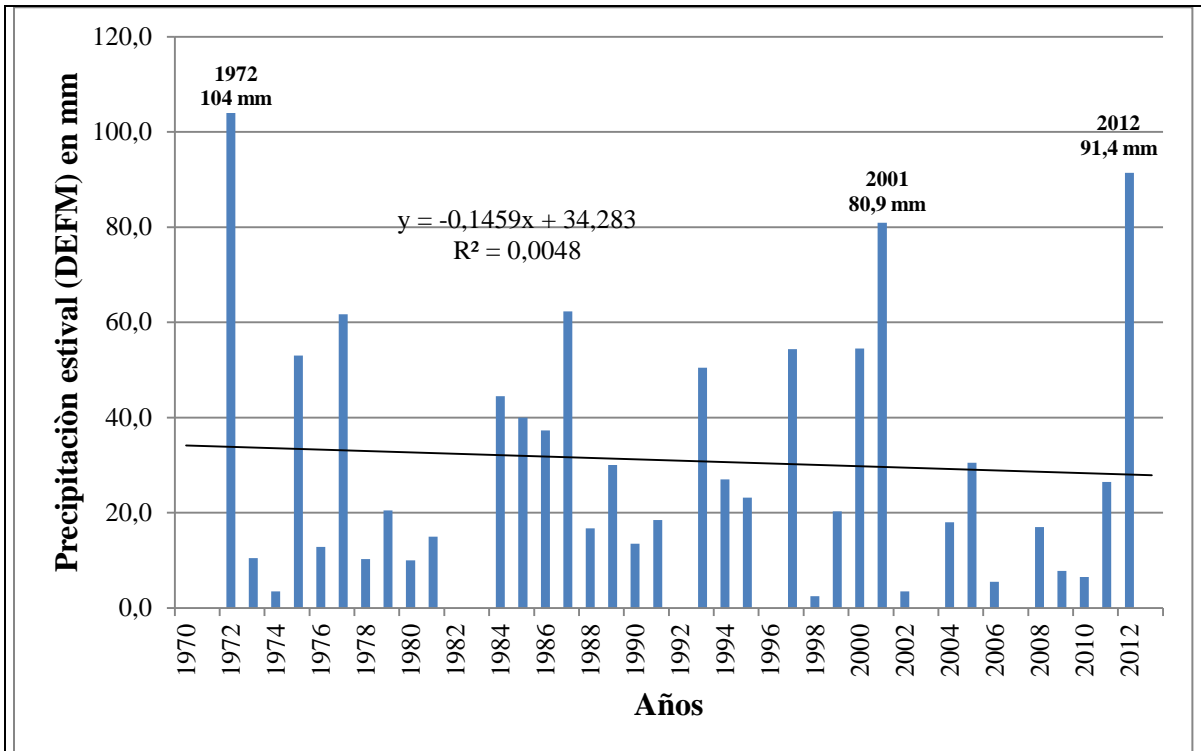


Gráfico 24. Precipitación Estación Parshall

Parshall muestra un cambio negativo en cuanto a la precipitación, donde está se ve disminuido durante el período 1970 – 2013. En la gráfica se aprecian los años con precipitaciones importantes como los años 1974 con 104 mm, 2001 con 80,9 mm y el 2012 con 91,4 mm. Ahora con respecto a los años con menores precipitaciones bordean los 3 a 4 mm anuales de agua caída, siendo ejemplos de estos los años 1974 y 2002 con 3,5 mm y el año 1998 con 2,5 mm.

g) Toconce

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca del río Loa a 3310 msnm. Perteneció administrativamente a la región de Antofagasta. Esta estación, como sus vecinas y compañeras de cuenca, presenta una disminución en sus montos de agua caída, y en semejanza con las otras estaciones, presenta montos muy variables de un años a otro, donde la variabilidad en las precipitaciones caída marcan diferencias destacables como son los años 2012 y 2013 con montos que superan los 300 mm para el primero y de 60 mm para el segundo.

Esta disminución se puede apreciar en los promedios para la estación donde para 15 años fue de 117,1 mm y para los 30 años es de 100 mm.

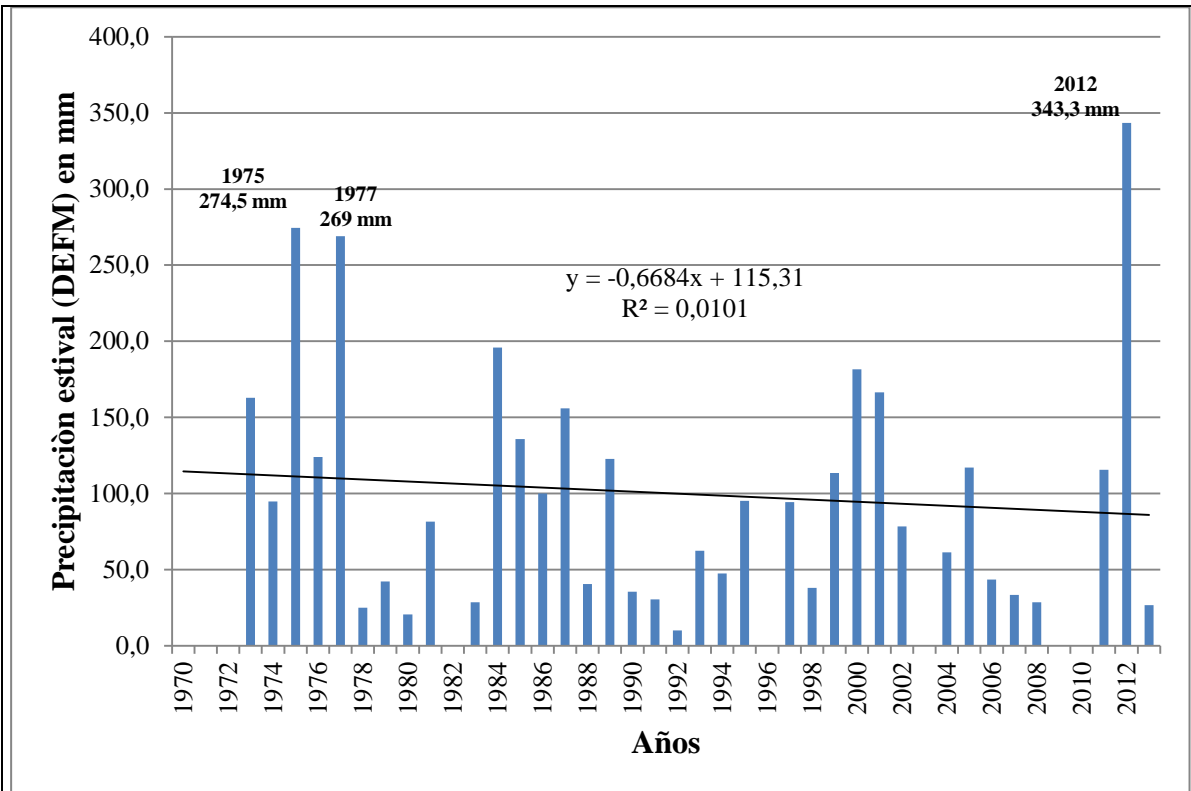


Gráfico 25. Precipitación Estación Toconce

Toconce muestra una disminución en los montos de precipitación durante los treinta años en estudio, donde se refleja una disminución de 6,68mm para 10 años y de 20,05mm para 30 años. Los años con mayores montos de precipitación registrados corresponden al año 2012 con 343,3mm caídos, mientras que el años con menor registro corresponde a 1992 con 10mm anuales.

h) Ayquina

Estación Meteorológica se encuentra inserta dentro de la cuenca del río Loa a 3031 msnm, en el valle del río Salado, tributario del río Loa. Pertenece administrativamente a la región de Antofagasta. Esta estación, al igual que las otras estaciones que forman parte de la misma cuenca, presenta una disminución en los montos de agua caída de 2,4mm en 10 años y de 7,1mm en 30 años, quedando de manifiesto en la pendiente, marcando dicha tendencia, tal y como se muestra a continuación:

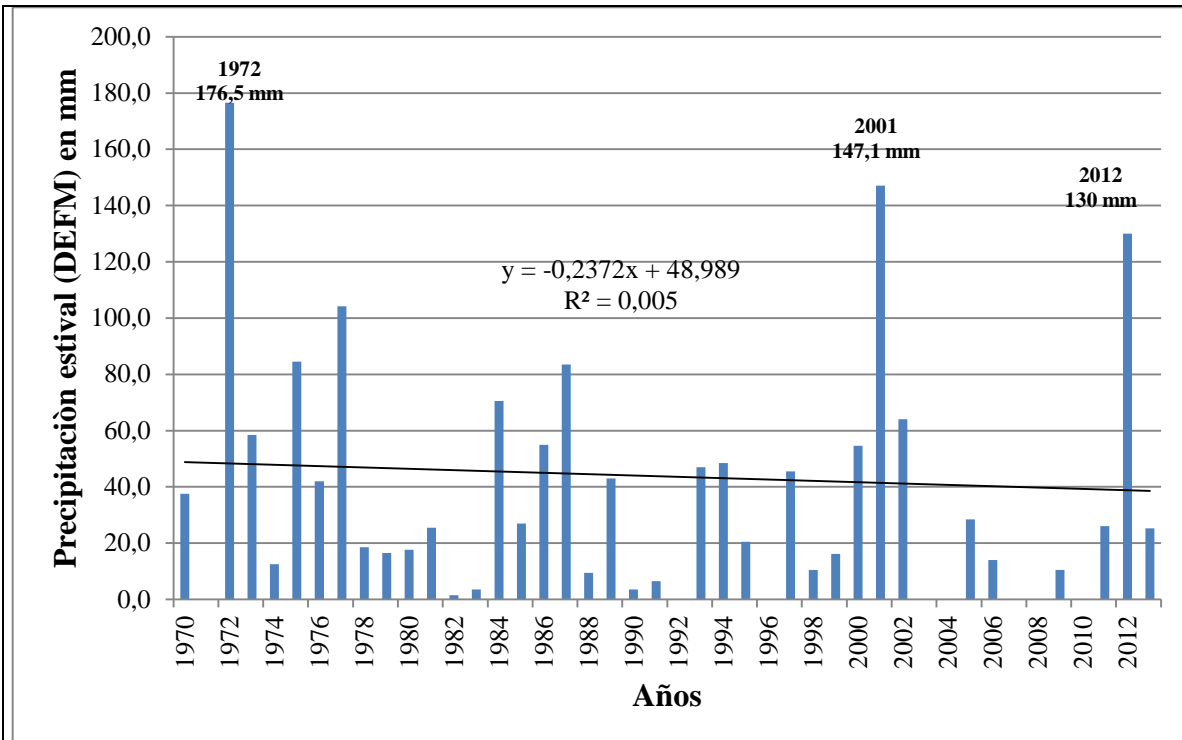


Gráfico 26. Precipitación Estación Ayquina

Ayquina en su condición de valle en un tributario del río Loa, presenta una disminución en sus montos de precipitaciones en el período 1970 – 2013. Como promedio para los treinta años analizados la precipitación disminuyó de 56, 83mm a 44, 04mm.

Con respecto a los años más lluviosos corresponden a 1972 1766,5mm caídos y al 2001 de 147,1mm de agua caída; y los años con menos precipitación corresponden a 1983 y 1990 con 3,5mm caídos respectivamente.

i) El Loa

Estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto El Loa, a 5 km al sureste de la ciudad de Calama a 2293 msnm, formando parte de la cuenca del Río Loa, ubicándose en la parte central de ésta.

El Loa muestra un descenso en los montos de agua caída durante los cuarenta años de estudio, tal y como lo muestra la gráfica, donde desde 1970 hasta 2013 el descenso es constante. Si bien es cierto se presentan años donde los montos de agua caída superan los 10 mm y hasta los 25 mm, las precipitaciones en esta zona en temporada estival no superan los 10 mm

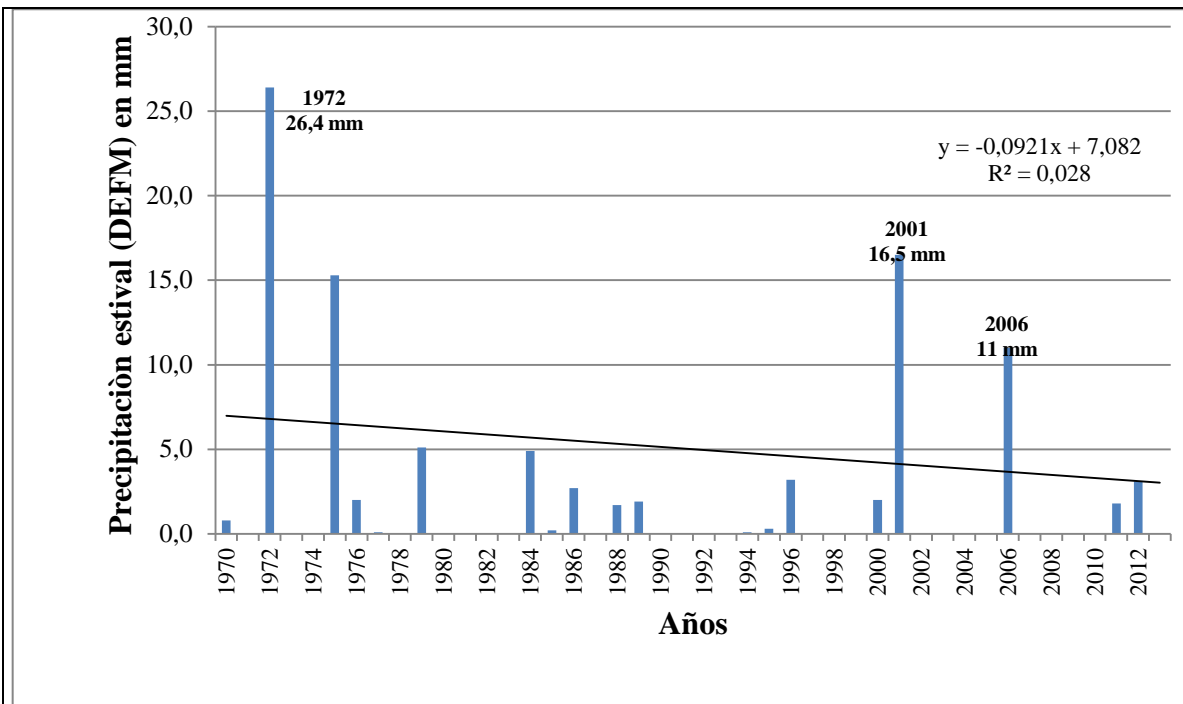


Gráfico 27. Precipitación Estación El Loa

El Loa presenta un descenso en sus montos de agua caída en los cuarenta años analizados, presentando bajas que van desde los 0,9 mm en 10 años a 2,73 mm en 30 años. Los años donde más precipitó corresponden a los años 1972 con 26,4 mm; 2001 con 16,5 mm y 2006 con 11 mm respectivamente, y así también se presentan años en los cuales no precipitó.

4.1.2.4. Estaciones Altiplánicas

Estas estaciones corresponden a las ubicadas sobre los 4000 msnm, donde las precipitaciones van desde los 70 mm a los 600mm, siendo más abundantes hacia el límite norte del país, y disminuyendo a medida que se avanza latitudinalmente.

Las seis estaciones analizadas entregaron información de las precipitaciones y sus tendencias, alcanzando un 95% de recolección de datos, testimonios importantísimos para la caracterización de las tendencias este sector del área de estudio.

Información a destacar es que de las seis estaciones seleccionadas sólo una presenta un aumento de las precipitaciones en el treintenio analizado, mientras que las otras cinco mostraron disminuciones a destacar en los montos de agua caída en el período en estudio, quedando de la siguiente manera:

a) Visviri

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca altiplánica de Caquena – Uchusuma a 4080 msnm. Es la estación más septentrional analizada, ubicada a 3 km. del límite con Bolivia, y a 12 de la frontera con el Perú. Es una de las estaciones donde se presentan los montos más altos de agua caída en los meses estivales llegando a los 536 mm en 1976; 532 mm en 1984 y 436,4 mm en 1986; y los montos bajos de agua caída corresponden a los años 1983 con 58.4 mm y al 2010 con 59,3mm.

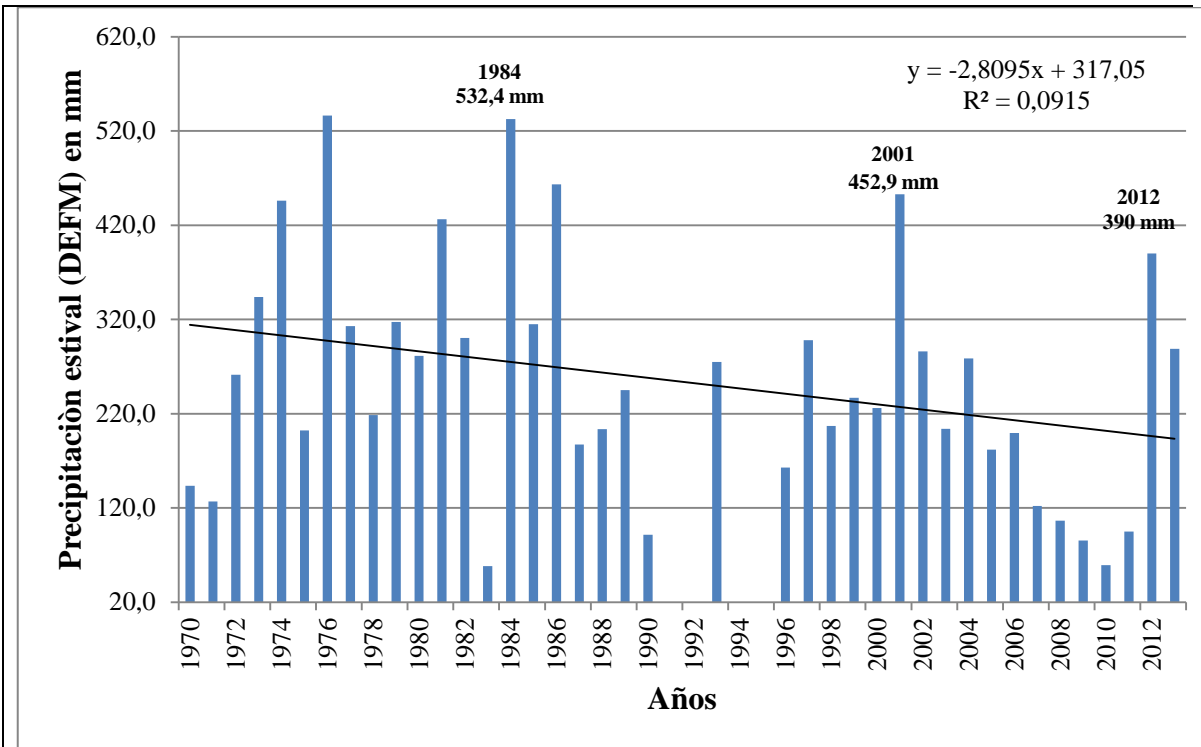


Gráfico 28. Precipitación Estación Visviri

Visviri es una de las localidades donde más monto de agua caída se presenta. Con sus 4000 msnm presenta lluvias con una gran variabilidad, pasando de períodos con precipitaciones sobre los 500 mm, a años donde precipita 1/5 de esta. Según se aprecia en el gráfica, las precipitaciones disminuyeron en una rango de 28,1 mm en 10 años y de 84,3 en los treinta años en estudio. Esta es una de las estaciones que presentó disminuciones abruptas en sus montos de agua caída, con promedios van de 310, 9mm en 15 años a 254,2 mm para 30 años, siendo sólo superadas por la estación Lequena,

b) Cotacotani

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca altiplánica del río Lauca, en la región de Arica y Parinacota a 4550 msnm. Se emplaza cercana a las lagunas de Cotacotani, sector de gran importancia por su fuente de agua, forraje y alimento para las comunidades pastoriles trashumantes del altiplano ariqueño; por lo que los montos de agua caída en la zona poseen un significado económico y de supervivencia.

Cotacotani, junto con la estación de Visviri son las que presentan los montos más altos de agua caída, alcanzando los 581 mm en el año 2001, siendo el máximo de todas las estaciones analizadas y del período 1970 – 2013; mientras que su mínimo corresponde a 40,2 mm en el año 1983

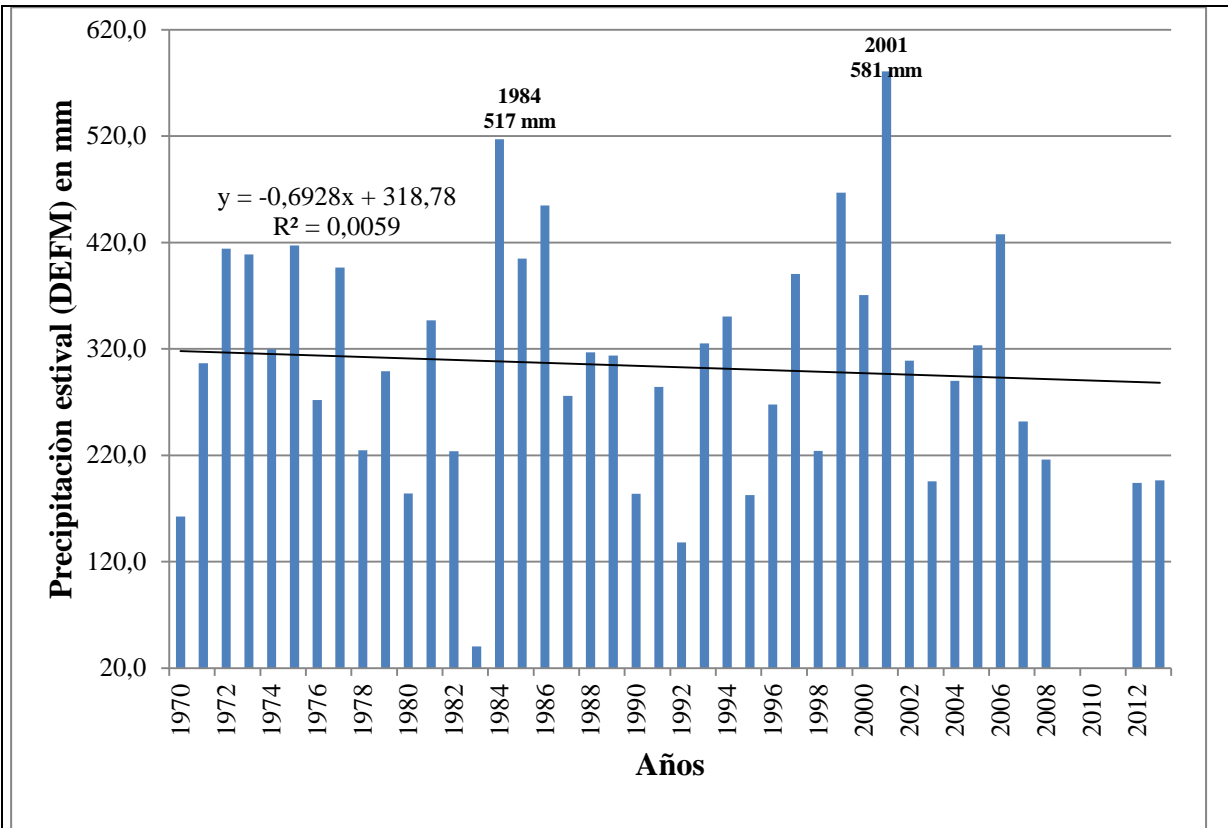


Gráfico 29. Precipitación Estación Cotacotani

Cotacotani muestra una tendencia a la baja en la precipitación en el período de 1970 – 2013, con un promedio de 317,2 mm para los primeros 15 años y de 304,1 mm en 30 años, demostrando una disminución en el agua caída, quedando representada por rangos que van desde 6,9 mm para 10 años y de 20,8 mm para los 30 años. Las precipitaciones en este sector del Altiplano presentan gran variabilidad, pasando de años donde sólo precipitan 40 mm en el año 1983, para luego precipitar 517 mm al año siguiente. Luego de este período disímil, las lluvias se mantuvieron sin mayores oscilaciones en cuanto a los extremos, teniendo solo un año que se escapa de los valores centrales, llegando casi a los 600 mm en el 2001.

c) Chucuyo

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca altiplánica del río Lauca, en la región de Arica y Parinacota, a 4400 msnm. Situada en las cercanías de la laguna de Parinacota, esta estación presenta disminución en los montos de agua caída durante el treintenio en estudio registrando bajas de 3,2mm en 10 años y de 9,6mm en 30 años; en concordancia a los datos obtenidos, coincidiendo en la baja de las precipitaciones.

Al igual que Cotacotani, Chucuyo se ubica en un lugar estratégico cercano a un bofedal y laguna que brindan forraje y comida a las comunidades y animales que viven en el parque nacional Lauca, ecosistema que se ve afectado con la falta de lluvia, impidiendo la recarga de acuíferos y el crecimiento de nuevos pastizales.

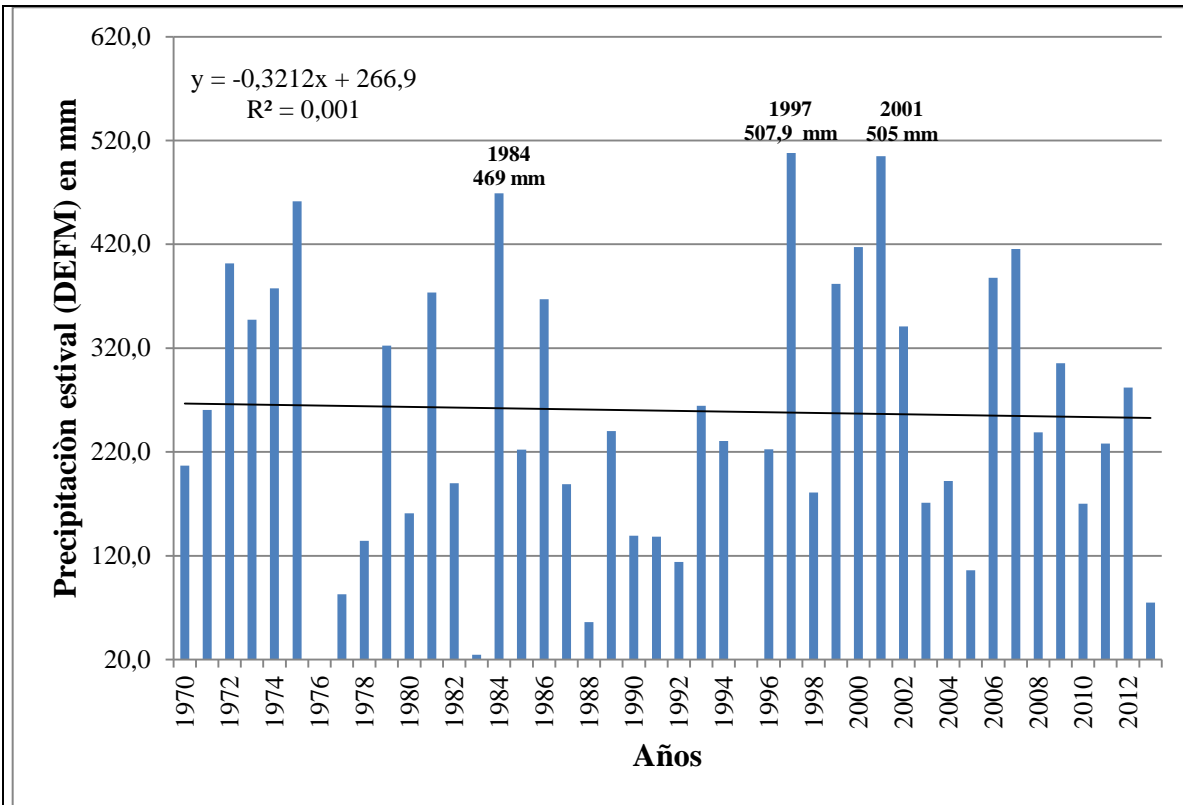


Gráfico 30. Precipitación Estación Chucuyo

Chucuyo presenta una disminución atenuada de las precipitaciones durante los años 1970 – 2013, con un promedio de 269 mm en 15 años y 259,5 mm en 30 años, demostrando una disminución en el agua caída, quedando representada por rangos que van desde 3,2 mm para 10 años y de 9,6 mm para los 30 años. Las precipitaciones en esta estación se presentan oscilantes pasando de años con montos considerablemente altos de agua caída alcanzando los 507,9 mm en el año 1997, 505 mm en 2001 y 469 mm en 1984; así como también años en los cuales las precipitaciones disminuyen considerablemente llegando a montos bajo los 100 mm como en 1983 con 24,6 mm y 56 mm en 1986.

d) Guallatire

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca altiplánica del río Lauca a 4240 msnm, en los faldeos del volcán Guallatire, en la región de Arica y Parinacota. Esta estación, en similitud a las otras localidades con la que comparte cuenca, presenta disminución en sus montos de agua caída, siendo junto con Visviri las que más disminuyen, presentando rangos que van desde los 35,4 mm para 10 años a 106,2 mm en 30 años, marcando la tendencia a la baja tal como lo muestra la pendiente en la siguiente gráfica:

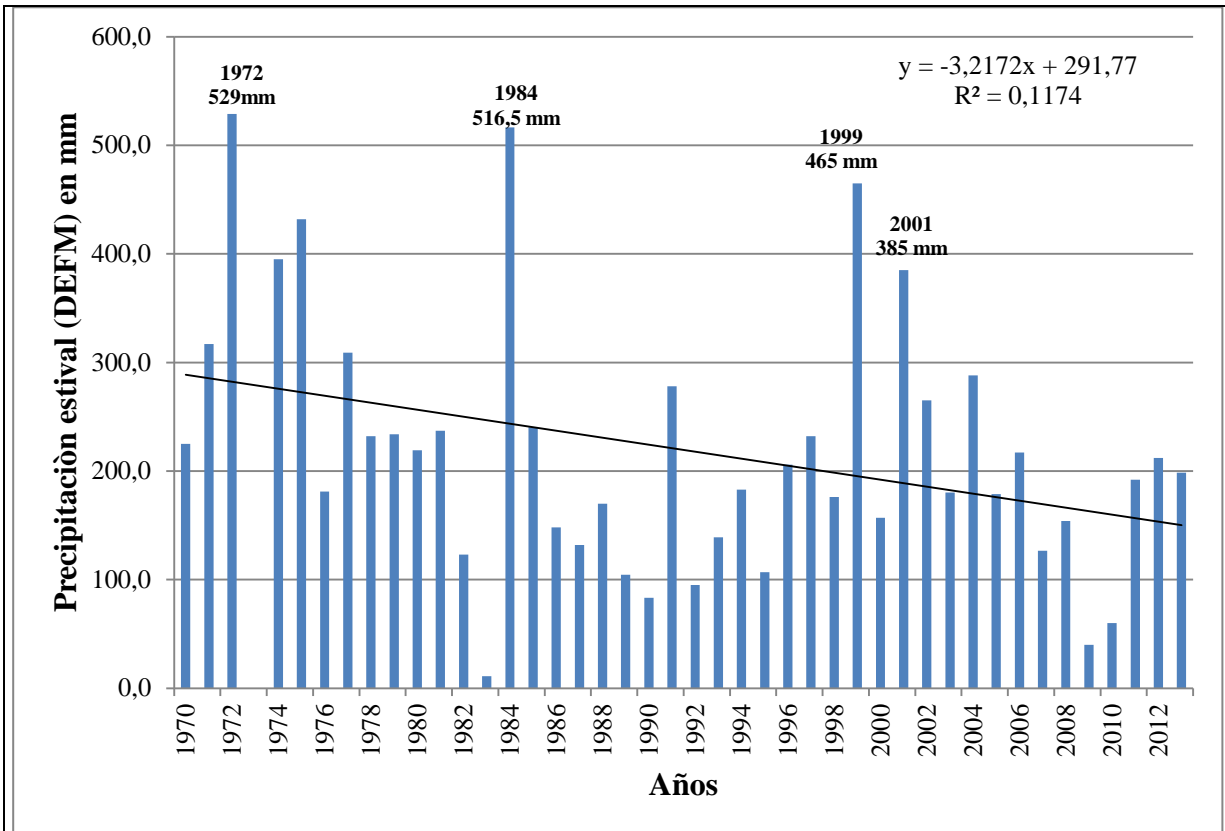


Gráfico 31. Precipitación Estación Guallatire

Guallatire presenta precipitaciones en descenso en los últimos 30 años, pasando de un promedio de 290 mm a 180 mm; dejando una clara señal que esta situación no cambiara en los años venideros. Con períodos de abundante lluvia en la temporada estival como lo fueron los años 1972 con 529mm, 1984 con 516,5 mm y 1999 con 465 mm; Guallatire también cuenta con períodos de baja precipitación representados por los años 1983 con 11 mm de agua caída.

e) Coyacagua

Estación Meteorológica ubicada en la cuenca altiplánica de Huasco, en región de Tarapacá a 4013 msnm. Es la única estación que contaba con los datos suficientes para poder realizar un análisis sobre la precipitación en la región de Tarapacá, ya que las otras estaciones con las que cuenta la región, contaban con la información pero sus bases de datos estaban por debajo del 95% de datos necesarios para esta investigación.

Esta estación, al igual que la mayoría vistas para el altiplano, presenta una disminución en los montos de agua caída durante el período en estudio 1970 – 2013, la que es reflejada en rangos que van desde 3,5mm en 10 años y 10, 6 mm en 30 años.

Aquí se puede apreciar la disminución de las precipitaciones debido a su ubicación más austral, marcando como máximos de agua caída valores que no superan los 400mm.

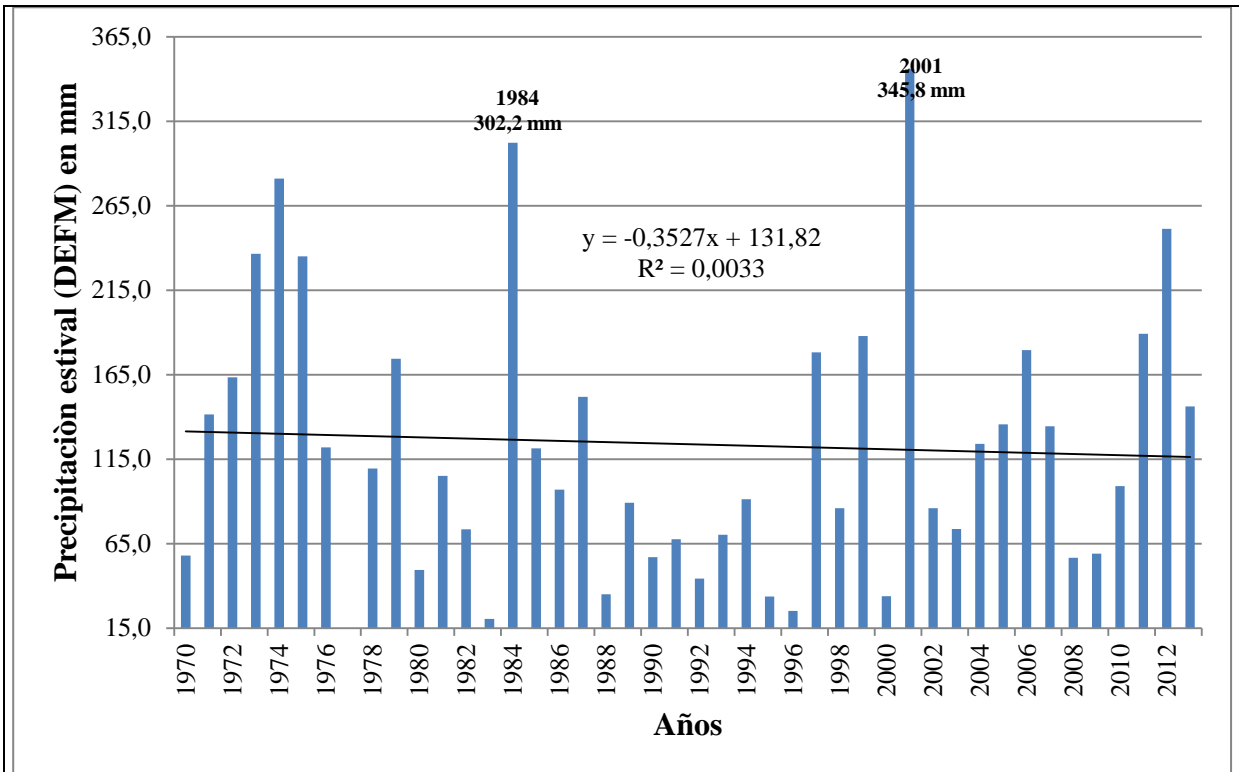


Gráfico 32. Precipitación Estación Coyacagua

Coyacagua presenta una disminución discreta de sus precipitaciones en los 30 años de estudio quedando reflejado en sus promedios de precipitación en los 15 primeros años 143,1 mm y en los 30 años 123,7mm. Haciendo referencia a los montos de agua caída en la estación, los mayores montos corresponden a los años 2001 y 1984 con 345,8mm y 302,2mm respectivamente; mientras que los montos más bajos de agua caída se registraron en los años 1983 y 1990 con 20,5mm y 57mm.

f) Inacaliri

Estación Meteorológica ubicada en la Cuenca altiplánica del salar de Ascotán, a 4040 msnm, en la región de Antofagasta. Es la estación más austral analizada en esta investigación, ubicada cerca de la frontera con Bolivia

En esta estación se puede apreciar un leve aumento de las precipitaciones aumentando en 9,96 mm en 10 años a 29,9mm en 30 años; siendo una de las cuatro estaciones que presenta un leve aumento en sus montos de agua precipitada en los 30 años analizados. Así las cuatro estaciones que presentan aumentos en sus montos de agua caída corresponden a las tres subdivisiones que se han aplicado para este análisis, entregando observaciones diferentes en cuanto al comportamiento de la precipitación en estas estaciones donde los montos de agua caída son más bajos que los de las estaciones ubicadas más al norte

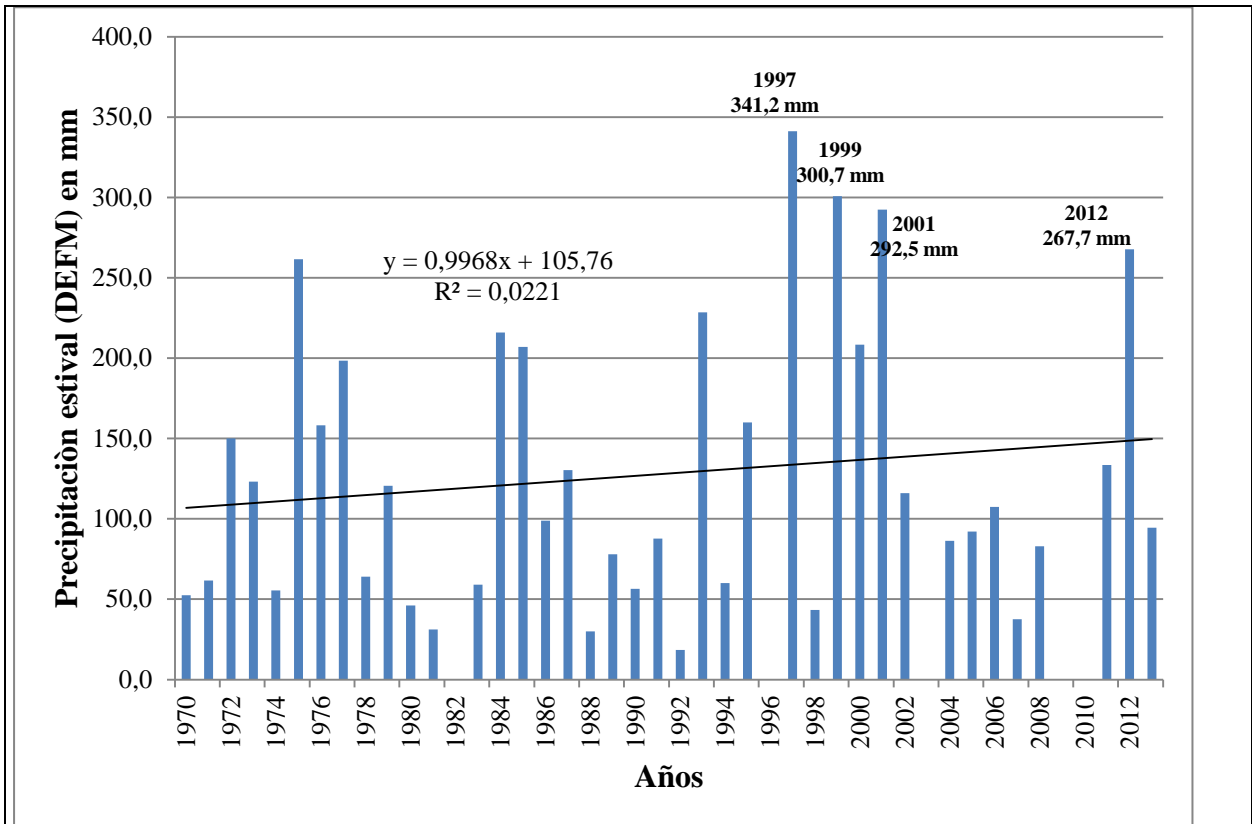


Gráfico 33. Precipitación Estación Inacaliri

Inacaliri presenta un aumento en sus precipitaciones en los 30 años de estudio quedando reflejado en sus promedios de agua caída en los 15 primeros años 109,9 mm a 127,09mm en 30 años.

Haciendo referencia a los montos de agua caída en la estación, los mayores montos corresponden a los años 1997, 1999 y 2001 con 341,2mm; 300,7mm y 292,5 mm respectivamente; mientras que los montos más bajos de agua caída se registraron en los años 1992,1988 y 1983 con 18,5mm, 30mm y 59mm; respectivamente.

Resumen

Las precipitaciones en el norte grande muestran una considerable tendencia a la baja durante los 44 años de estudio, presentando casos como la estación Lequena con una disminución de 132,8 mm menos en los últimos treinta años. Como contraparte se presenta la estación de Inacaliri con un leve aumento de 30 mm en treinta años.

Hay que destacar, que en las 18 estaciones se presentan años donde hay un aumento importante en los montos de agua caída, coincidiendo con años donde El Niño se presenta, haciendo referencia principalmente a los años 1984 – 1997; y años donde La Niña se manifiesta siendo el año 2001 el más representativo en varias estaciones; años que en los meses estivales de diciembre, enero, febrero y marzo se presentaron lluvias con montos importantes en las estaciones estudiadas y que en muchos casos marcaron los montos más altos de agua caída en los 44 años de estudiadas.

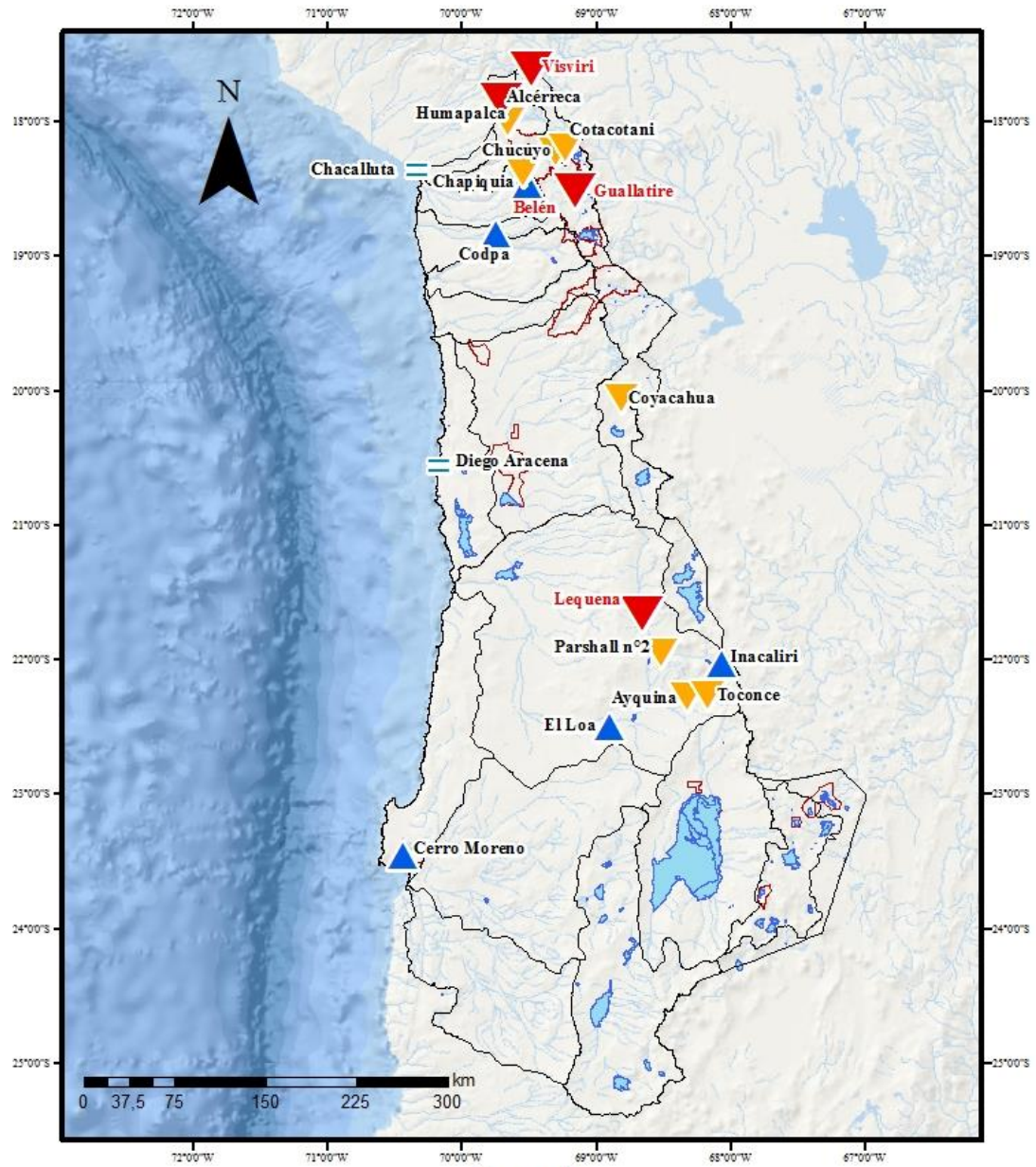
Tabla 13. Tabla Resumen tendencia en Precipitaciones a 30 años

Estación	Tendencia decadal	Tendencia a Treinta años	Coefficiente de correlación	Numero de datos	p_valor	Porcentaje
Chacalluta	0,05	0,1	0,0632	44	0,4897	51%
Visviri	-28,1	-84,3	0,3025	40	0,0600	94%
Cotacotani	-6,9	-20,8	0,0768	41	0,6332	37%
Chucuyo	-3,2	-9,6	0,0316	42	0,8446	16%
Guallatire	-35,4	-106,2	0,3894	42	0,0108	99%
Coyacagua	-3,5	-10,6	0,0574	43	0,7147	29%
Humapalca	-25,8	-77,3	0,2166	42	0,1674	83%
Alcerreca	-7,5	-22,4	0,0877	43	0,5747	43%
Chapiquia	-6,0	-18,0	0,0762	43	0,6270	37%
Belén	3,8	11,5	0,0095	39	0,0424	96%
Codpa	2,3	6,8	0,2022	39	0,2175	78%
Diego Aracena	0,01	0,03	0,0583	44	0,3534	65%
Lequena	-44,3	-132,8	0,4055	36	0,0143	99%
Parshall	-1,5	-4,4	0,0693	35	0,6934	31%
Inacaliri	10,0	29,9	0,1487	39	0,3653	63%
Toconce	-6,7	-20,1	0,1005	36	0,5597	44%
Ayquina	-2,4	-7,1	0,0707	36	0,6820	32%
El Loa	0,9	2,7	0,1673	44	0,1388	86%
Cerro Moreno	0,2	0,8	0,1967	44	0,1003	90%

En las figura, se aprecian las estaciones y su distribución espacial, marcadas con colores azules las estaciones que aumentaron sus montos de agua caída, y con colores rojos las que disminuyeron sus precipitaciones.

Como punto a destacar las estaciones que presentaron los mayores aumentos y disminuciones en toda el área de estudio, se encuentran en la misma región, marcando claras diferencias geográficas entre la precordillera y el altiplano en esta región.

Figura 25. Tendencia en Precipitaciones a 30 años



Leyenda

**Estación Meteorológicas
Tendencias a 30 años (mm)**

- ▼ -132,8 - -77,2
- ▲ -77,2 - -3,04
- ▬ -3,04 - 0,32
- ▲ 0,32 - 29,9

- Cuerpos de Agua
- Áreas SNASPE
- Cuencas

4.2. Teleconexiones y su influencia en las precipitaciones en el norte grande de Chile

Las teleconexiones como patrones de baja frecuencia condicionan las precipitaciones a lo largo de Chile. Para el caso del altiplano, se utilizaron seis teleconexiones de las cuales dos son atmosféricas (Índice Oscilación del Sur SOI y Índice Monzón Unificado SASM) y cuatro oceánicas (Oscilación Decadal del Pacífico PDO, Índice ENSO Multivariado MEI, Niño 3-4, ENSO MODOKI)

Tabla 14. Teleconexión y Ecuaciones

Estación y Ecuación	Valor Crítico F
Pp° Visviri= 252,30+SOI-1*10,72+PDO-2*43,046+MEI1*-32,43+NIÑO3.4*30,42+MODOKI-2*-37,04	0,134005508
Pp° Cotacotani =317,19+SOI-2* 53,61+PDO-2*46,42+MEI*-8,25+NIÑO3.4*-19,44+MODOKI-2*11,21	0,009051244
Pp° Chucuyo= 270,43+SOI-1*-16,83+PDO-3*26,86+MEI*-184,93+NIÑO3.4*122,13+MODOKI*-58,16	0,012941359
Pp° Guallatire= 218,28+SOI-1*-25,97+PDO*18,04+MEI-1*-102,75+NIÑO3.4-2*21,23+MODOKI-2*-9,32	0,10482353
Pp° Coyacagua= 117,94+SOI-2*34,28+SASMI*-81,32+PDO-3*-5,73+MEI-1*-36,57+NIÑO3-4*52,73+MODOKI-2*-20,39	0,04023061
Pp° Humapalca= 285,53+SOI-2*-88,64+PDO-3*-29,65+MEI*-467,10+NIÑO3.4*384,29+MODOKI-2*-101,84	0,000888492
Pp° Alcérreca= 191,41+SOI-2*29,93+PDO*3,60+MEI-1*-28,53+NIÑO3.4*20,97+MODOKI*-27,73	0,087037105
Pp° Chapiquia = 154,34+SOI-2*24,00+PDO*13,21+MEI-1*-108,82+NIÑO3.4*108,92+MODOKI-2*-64,40	0,013296067
Pp° Belén= 162,07+SOI-2*40,77+PDO-3*2,94+MEI-1*-60,84+NIÑO3.4*100,88+MODOKI*-74,11	0,222562357
Pp° Codpa= 18,11+SOI-2*9,16+PDO*1,05+MEI-2*-10,76+NIÑO3.4*13,82+MODOKI-2*-4,60	0,002347705
Pp° Lequena= 74,59+ SOI-2*-90,19+PDO-3*-24,21+SASMI*-227,24+MEI-2*-110,31+MODOKI-2*-13,27	0,032141728
Pp° Parshall = 28,95+SOI-2*-6,28+PDO*3,79+MEI-2*-9,59+NIÑO3.4-3*7,22+MODOKI-2*-7,50	0,404646462
Pp° Inacaliri= 130,33+SOI*6,37+PDO*16,04+MEI-1*-113,14+NIÑO3.4*98,72+MODOKI-2*-35,14	0,091662267
Pp° Toconce = 108,26+SOI-1*-10,90+PDO-3*-11,72+MEI-1*-168,99+NIÑO3.4*158,86+MODOKI-2*-42,63	0,018525052
Pp° Ayquina= 43,29+SOI*-20,32+PDO*-1,26+MEI*-39,69+NIÑO3.4*13,84+MODOKI-2*-5,57	0,812851193

A través del procesamiento de los índices calculados para los meses estivales de diciembre, enero, febrero y marzo con sus respectivos desfases³, los resultados evidenciaron cuál de las teleconexiones tenía mayor relación con las precipitaciones en el norte de Chile, quedando configuradas de la siguiente manera (ver tabla 13)

Tabla 15. Estaciones y Teleconexiones influyentes para cada una

Estación	Teleconexión Influyente
Visviri	SOI-1 PDO-2 MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI-2
Cotacotani	SOI-2 PDO-2 MEI NIÑO3.4 MODOKI-2
Chucuyo	SOI-1 PDO-3 MEI NIÑO3.4 MODOKI
Guallatire	SOI-1 PDO MEI-1 NIÑO3.4-2 MODOKI
Coyacagua	SOI-2 SASMI PDO-3 MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI-2
Humapalca	SOI-2 PDO-3 MEI NIÑO3.4 MODOKI-2
Alcérreca	SOI-2 PDO MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI
Chapiquia	SOI-2 PDO MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI-2
Belén	SOI-2 PDO-3 MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI

³ Desfase se entiende por los meses calculados con regresión en uno, dos o tres meses anteriores al inicio de la temporada estival.

Codpa	SOI-2 PDO MEI-2 NIÑO3.4 MODOKI-2
Lequena	SOI-2 PDO-3 SASMI MEI-2 MODOKI-2
Parshall n°2	SOI-2 PDO MEI-2 NIÑO3.4-3 MODOKI-2
Inacaliri	SOI PDO MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI-2
Toconce	SOI-1 PDO-3 MEI-1 NIÑO3.4 MODOKI-2
Ayquina	SOI PDO MEI NIÑO3.4 MODOKI-2
Chacalluta	SOI-1 PDO-3 MEI-3 NIÑO3.4-3 MODOKI-3
Diego Aracena	SOI PDO-3 MEI-3 NIÑO3.4-3 MODOKI-3
El Loa	SOI PDO-1 MEI-3 NIÑO3.4 MODOKI-3
Cerro Moreno	SOI-1 PDO-1 MEI-3 NIÑO3.4-2 MODOKI-3

Mayoritariamente el índice del sur (SOI) con desfase de dos meses, es la que correlaciona con las precipitaciones en el norte de Chile, y principalmente con signo positivo. Esto quiere decir que tiene directa relación con los eventos de precipitación en los meses invernales. Mayoritariamente el índice del Sur con desfase de 2 meses se correlaciona con las precipitaciones, y principalmente con signo positiva. Ello implica, que mientras mayor la presencia de valores positivos, menor será la influencia que esta poseen en las precipitaciones estivales, tal como se aprecia en la figura 26. Donde la mayor concentración de valores positivos se ubica en el sector Norte del área de estudio, correspondiendo a las estaciones de la región de Arica y Parinacota principalmente. A medida que se avanza más hacia el sur, esta relación se va disipando, dejando como evidencia su relación cada vez más estrecha entre las precipitaciones invernales, versus las precipitaciones estivales. De esta manera, en la zona norte del país las lluvias estivales se presentan con un Índice del sur positivo, haciendo clara alusión a la presencia de las precipitaciones con la fase fría de éste.

La Oscilación decadal del Pacífico (PDO) con desfase de tres meses, es la que mejor correlaciona con las precipitaciones en el norte de Chile. La presencia del índice con signo positivo denota la influencia de ésta teleconexión con las precipitaciones en su fase fría, dejando gran parte de las estaciones prealtiplánicas y altiplánicas bajo su influencia; mientras tanto las zonas costeras y de valles se ven influenciadas por las precipitaciones invernales, las que van aumentando mediante se avanza en latitud.

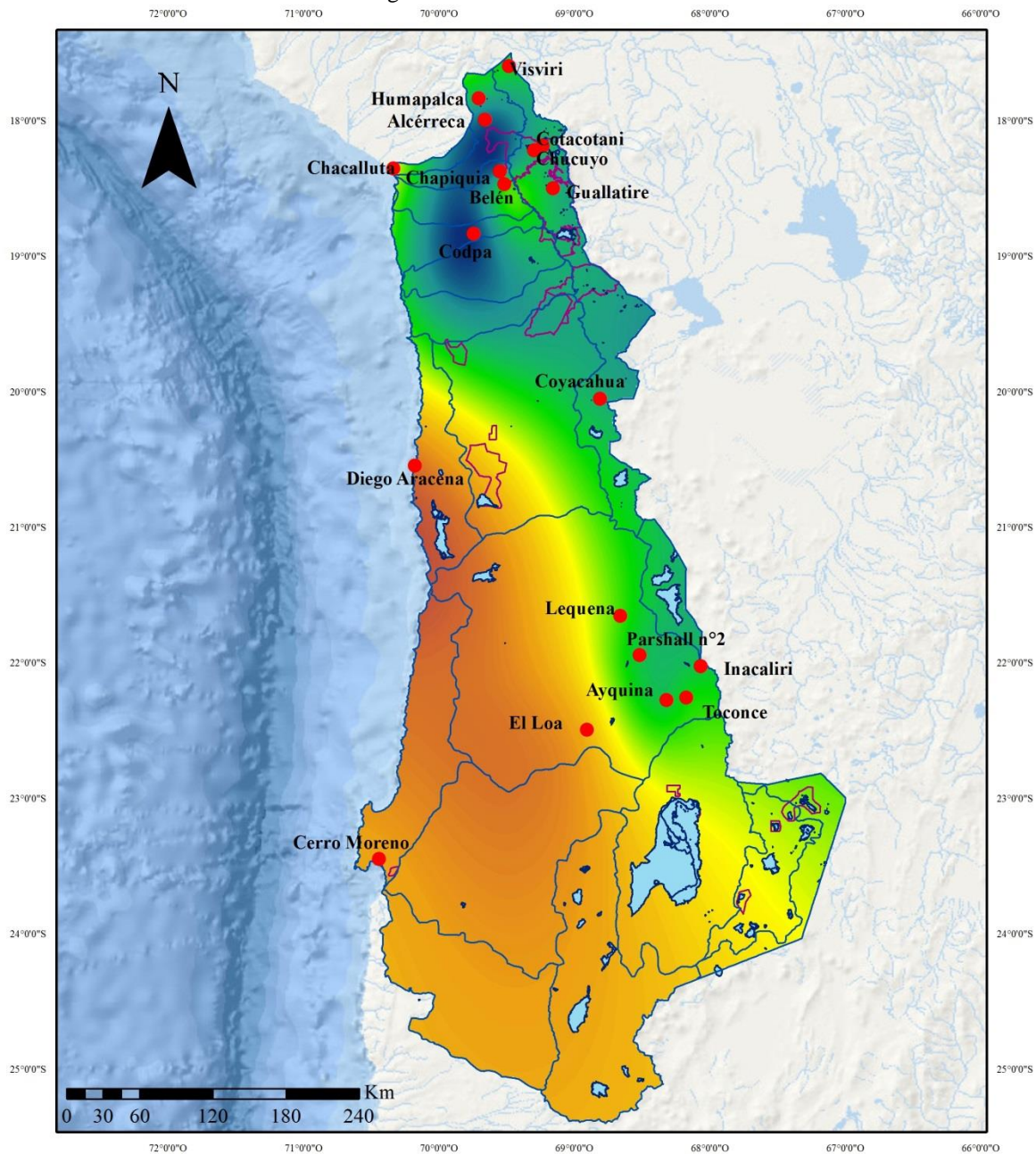
Con respecto a la Índice ENSO multivariado (MEI), con su desfase en dos meses, es el que mejor correlaciona con las precipitaciones del norte grande. Como se muestra en la figura 28 las precipitaciones en las regiones prealtiplánicas y altiplánicas se muestran con signo negativo, demostrando su estrecha relación con los eventos de la fase fría del ENSO; mientras que en la medida que se desciende en latitud, la influencia de los valores positivos ponen de manifiesto el dominio de la fase cálida del ENSO en las precipitaciones.

El índice Monzón Unificado (SASMI) es un patrón de baja frecuencia que evidencia de las zonas de influencia del Monzón Sudamericano y como esta condiciona las precipitaciones en el norte de Chile. Así en su fase positiva se relaciona con las precipitaciones en el altiplano, prealtiplano y parte de la costa del norte de Chile (ver figura 29). Con respecto a las zonas donde su correlación fue baja, coincide con las estaciones pluviométricas que presentaron las mayores disminuciones en cuanto a las precipitaciones en los 40 años analizados, siendo las estaciones de Guallatire y Lequena las que presentaron estas bajas considerables, coincidiendo con la correlación del SASMI. Hay que destacar que este patrón de baja frecuencia es relativamente nuevo en cuanto a su explicación e influencia en las lluvias monzónicas principalmente en el norte de Chile, por lo que estos resultados entregan información importante sobre la influencia de esta teleconexión.

Continuando con el análisis, El Niño3.4 como teleconexión, comparte información similar con el SOI y el MEI, ya que se calculan utilizando los mismos datos. Es así como en la figura 30 se aprecia la presencia de una correlación alta en la costa y valles de la región de Tarapacá y Antofagasta, en desmedro de la baja correlación en las zonas prealtiplánicas y altiplánicas de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, configurando la premisa que las precipitaciones estivales se presentan con la fase fría del ENSO, concentrándose en el área Norte de la región de Arica y Parinacota, disminuyendo mientras se avanza hacia el Sur.

Finalmente, el índice Modoki con desfase en dos meses, evidencia (figura 31) su área de influencia máxima y mínima, quedando nuevamente establecido que las lluvias en el Altiplano del norte grande se presentan con fases frías del ENSO, concentrándose los eventos precipitativos en el sector norte de la región de Arica y Parinacota, y disminuyendo hacia el sur.

Figura 26. Índice Oscilación del Sur



Leyenda

- Estaciones Pluviométricas
 - Cuencas
 - Cuerpos de Agua
 - Áreas SNASPE
- Índice Oscilación del Sur SOI-2
- Valor
- Alto : 0,575411
 - Bajo : -0,123587

Índice Oscilación del sur con desfase (N-D-E-F) y su influencia en las precipitaciones estivales

Figura 27. Oscilación Decadal del Pacífico

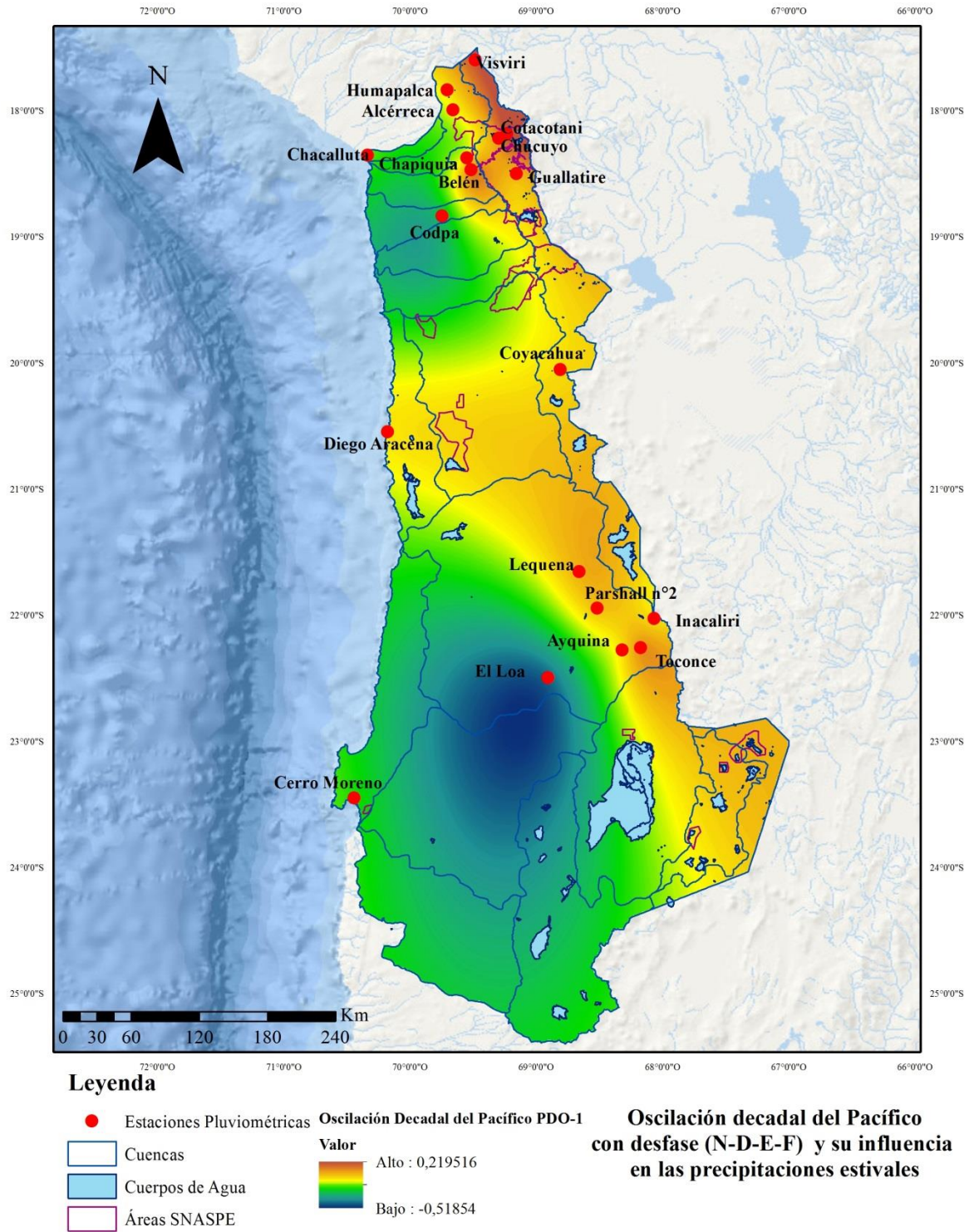


Figura 28. Índice ENSO Multivariado

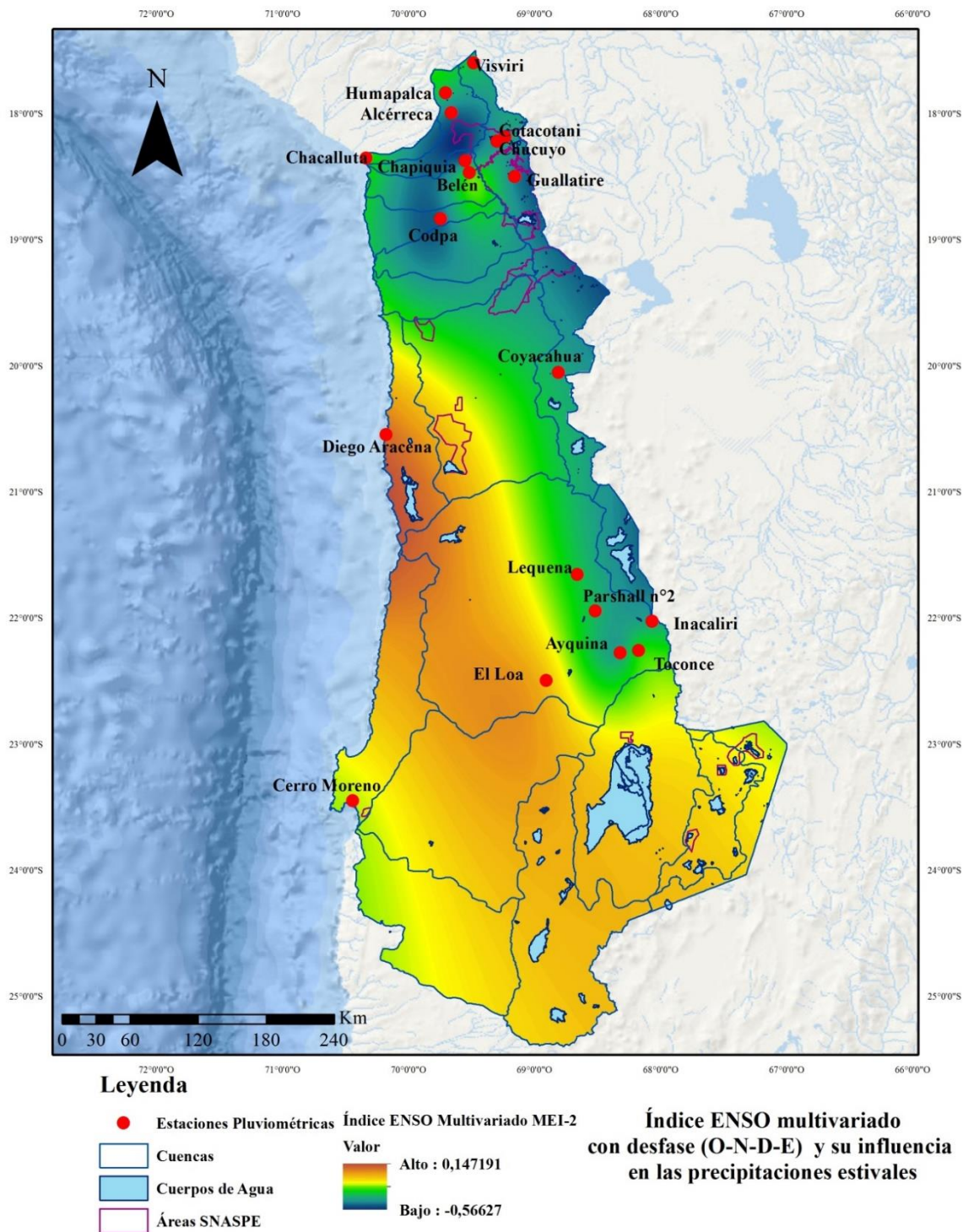


Figura 29. Índice Monzón Sudamericano SASM

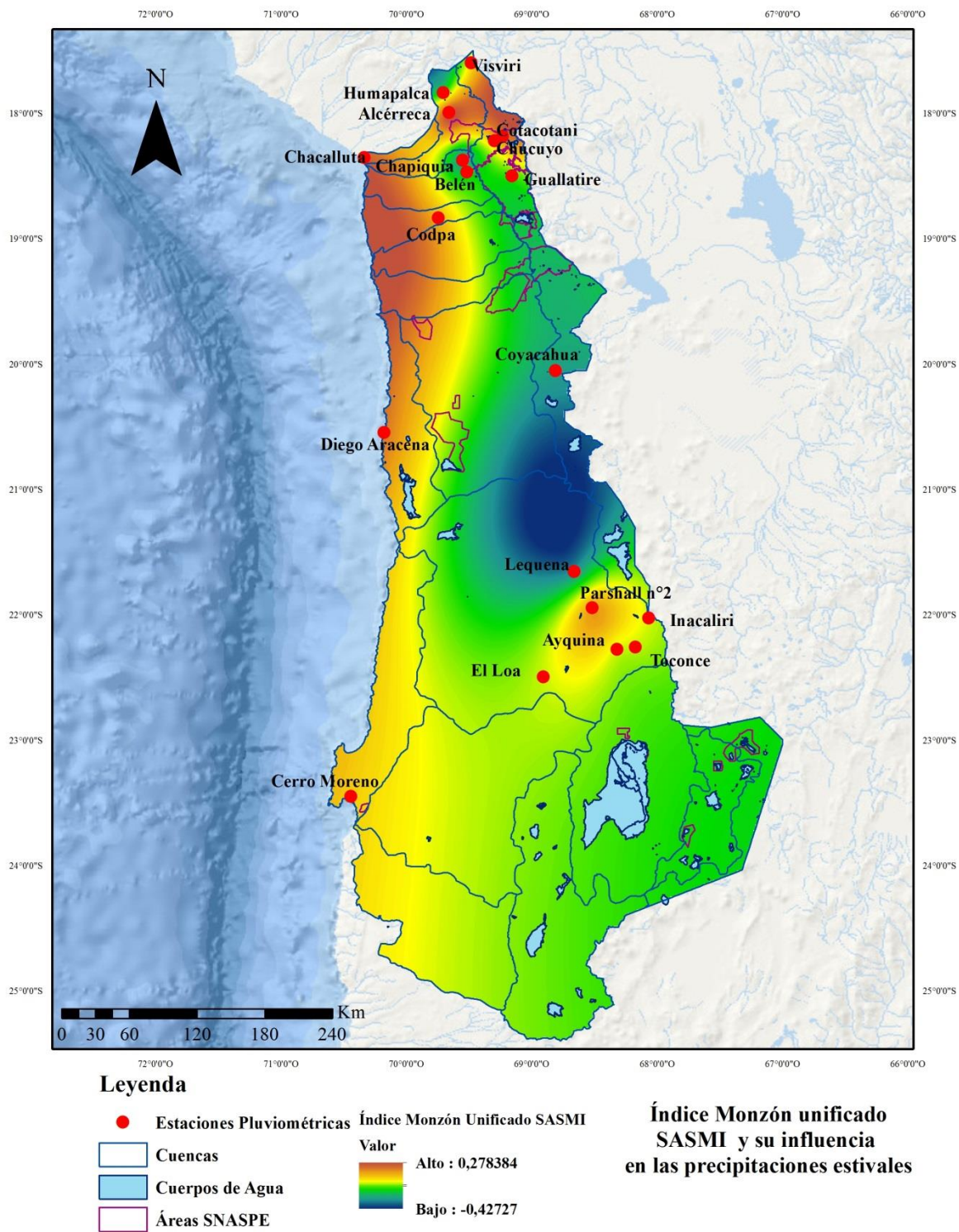


Figura 30. Índice El Niño 3.4

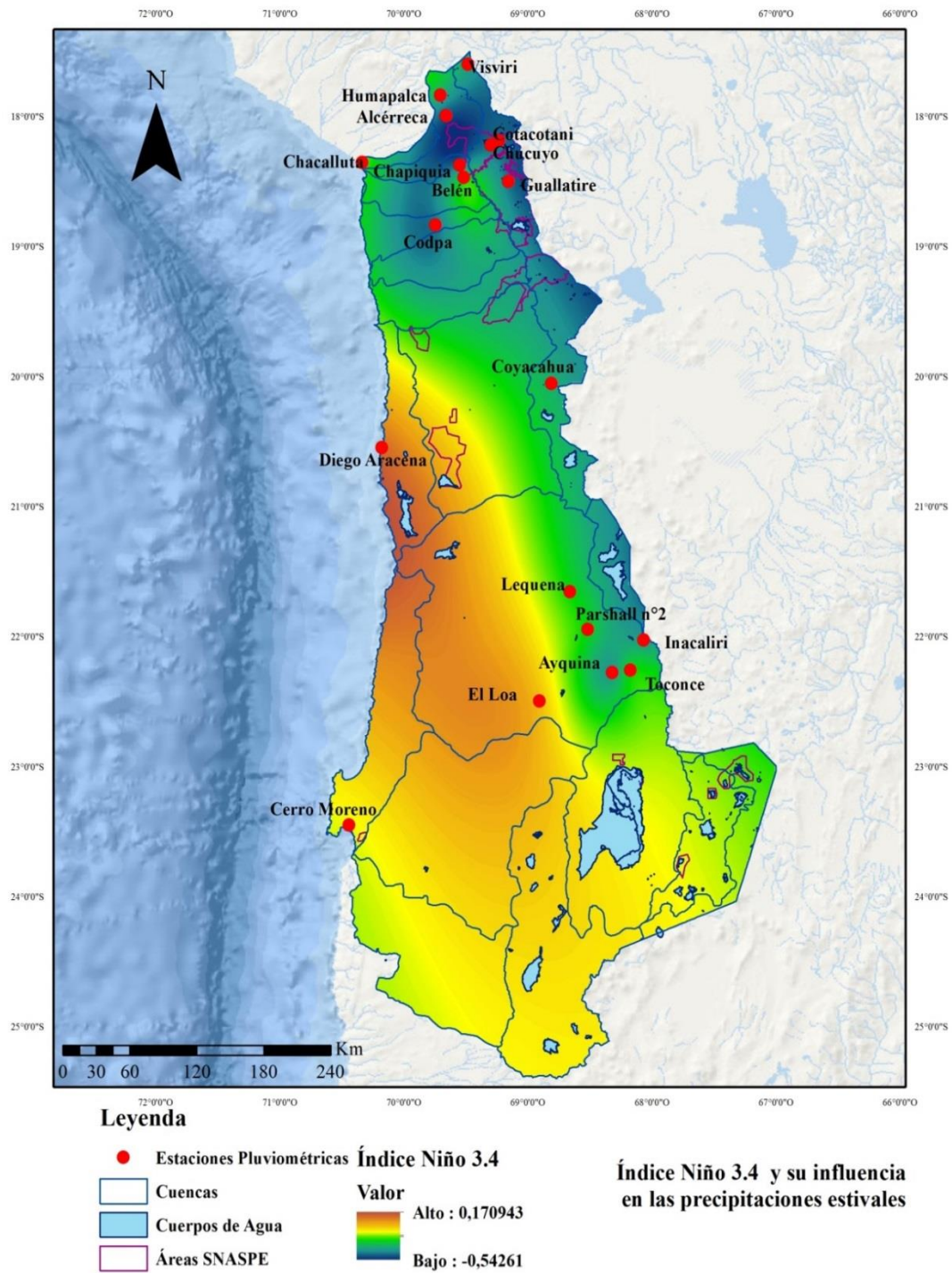
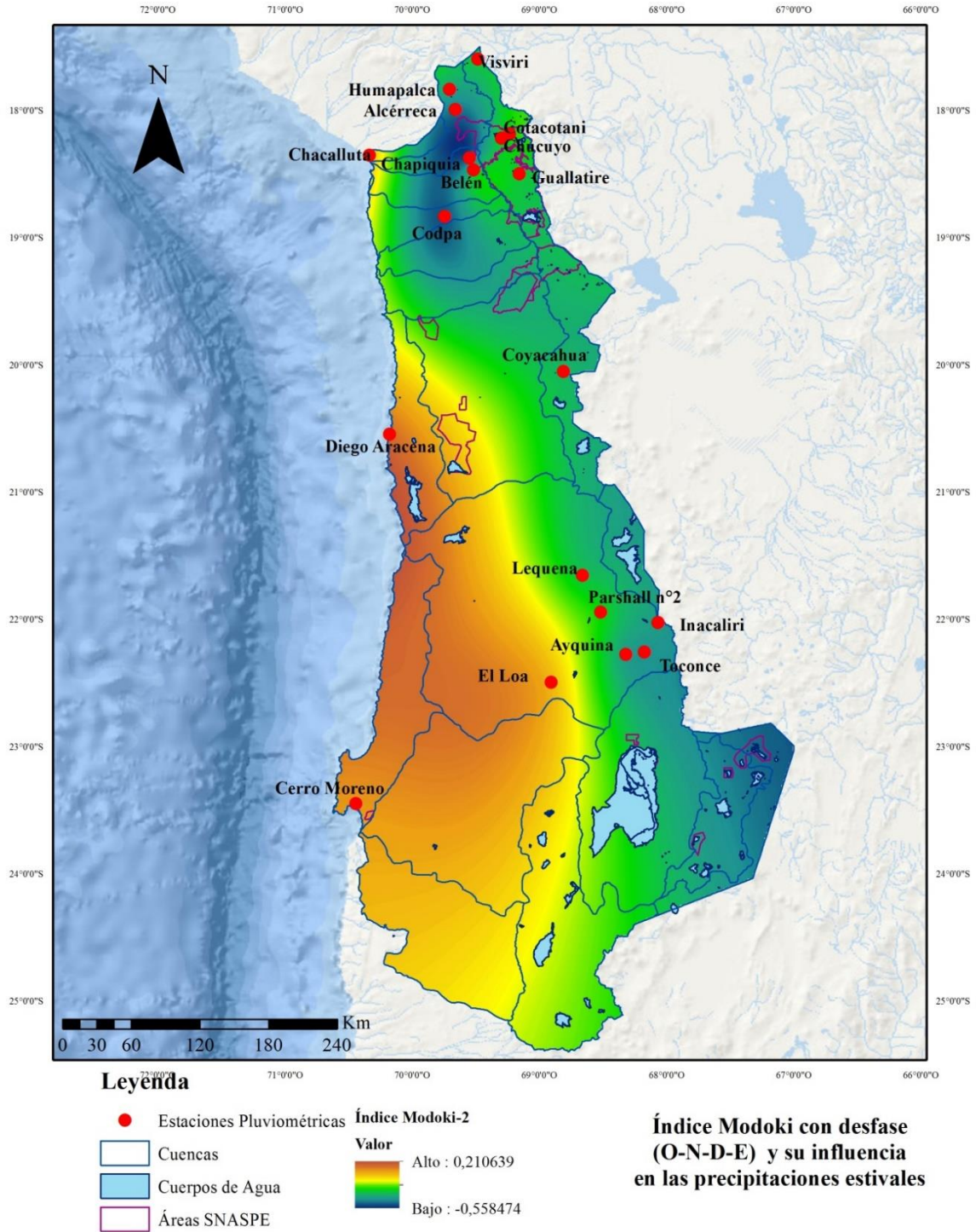


Figura 31. Índice Modoki



4.3. Cambios y Escenario Futuro (RCP 8.5) esperados para Norte Grande de Chile según Modelo de circulación global CSIRO ACCESS 1.3 al año 2080.

Según el IPCC para el 2100 las temperaturas habrán aumentado hasta 6°C. Estudios más regionales como lo expone sostienen que las temperaturas aumentarían por sobre los 5°C en el altiplano Chileno, poniendo en serio riesgo todos los humedales, bofedales y vegas que se ubican en esta zona.

El trabajo con los datos proporcionados por el modelo de circulación global Csiro Access 1.3, permitió avalar lo expuesto por Sarricolea y Romero (2015) para las dos primeras regiones en estudio (Arica y Parinacota y Tarapacá), y anexar a esta investigación los cambios posibles generados en la región de Antofagasta.

Así como se detalló en la metodología, se trabajó con 6 de las 19 variables bioclimáticas, las que para el modelo Access 1.3 entregaron los siguientes resultados:

a) Temperatura media anual (BIO 1)

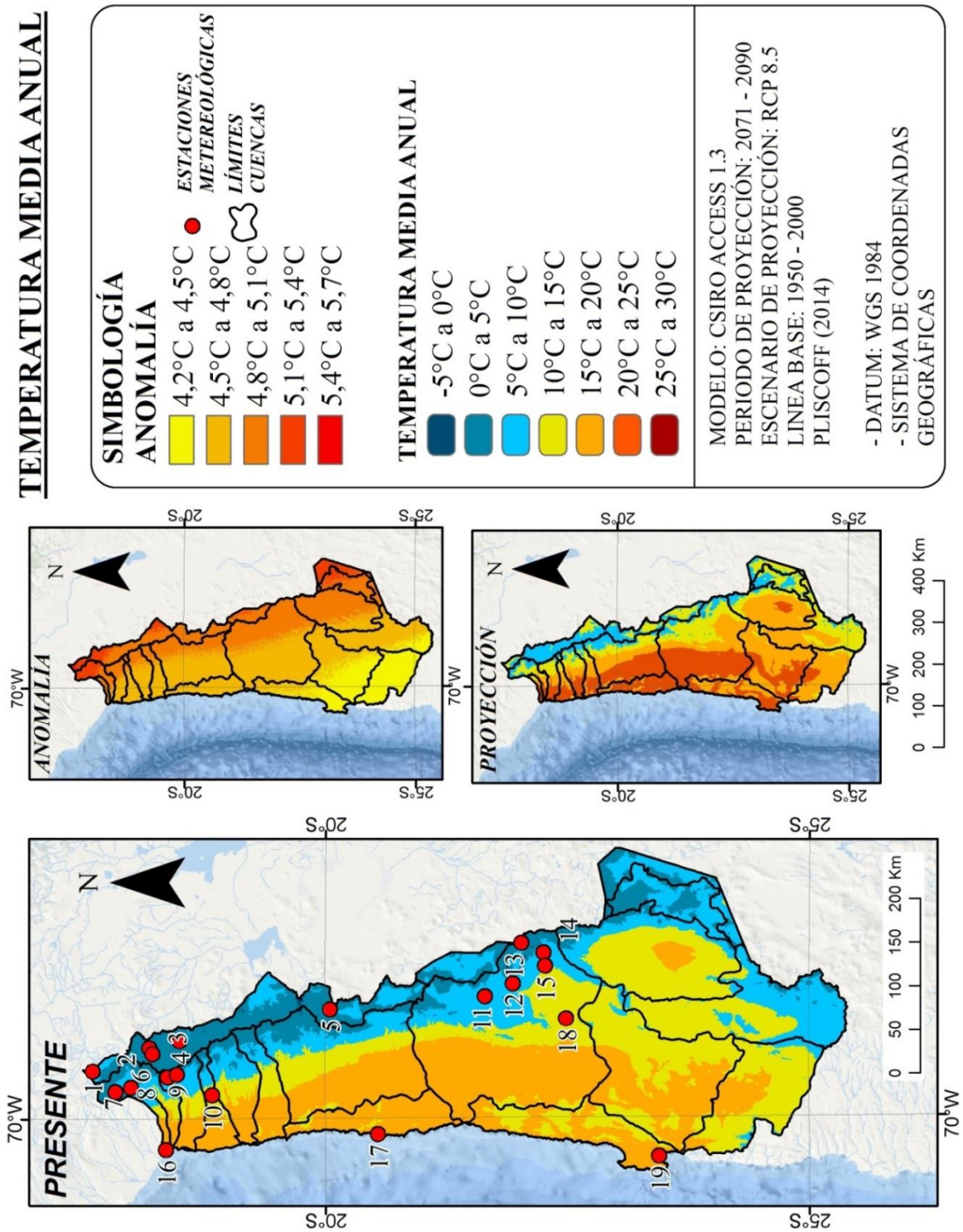
Actualmente, el área de estudio posee una temperatura media anual que va en aumento desde Este a Oeste, debido entre otras cosas a los factores geográficos que condicionan su homogeneidad, teniendo un comportamiento similar de norte a sur tanto en la costa, como en los valles, quebradas, precordillera y altiplano de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. (Ver Figura 32)

En la franja costera del área de estudio, la temperatura media anual se distribuye entre los 15°C y los 20°C, comportamiento que se evidencia también en la cordillera de costa y los valles y quebradas presentes en la depresión intermedia y las pampas desérticas de la zona. A medida que se avanza hacia el oriente, la precordillera presenta un leve descenso de la temperatura distribuyéndose entre los 10°C y los 15°C. Un dato a mencionar y que llama la atención es la presencia de una zona de aumento de la temperatura, ubicada en la cuenca del Salar de Atacama, donde la temperatura muestra un aumento entre los 15°C y los 20°C, siendo un área importante a destacar ya que en ella se encuentran reservas nacionales y área de conservación ecosistémica. Siguiendo con el recorrido hacia el oriente, entre la precordillera y el Altiplano nortino, es donde se presentan las temperaturas medias anuales más bajas, distribuyéndose entre los 5°C y los 10°C, llegando incluso a los 0°C y los 5°C.

Con respecto, a la anomalía proyectada para el escenario menos favorable RCP 8,5 del modelo Csiro Access 1.3; muestra un aumento de la temperatura de oeste a este, concordando con el aumento altitudinal actual del área de estudio. Este incremento de la temperatura media anual para el año 2080 puede fluctuar entre los 4,2°C en la costa; y los 5,4°C en el Altiplano.

De esta manera, la proyección para el período 2071 – 2090 en el escenario RCP 8,5, muestra un aumento importante de las temperaturas en toda el área de estudio. En los sectores costeros, valles y quebradas y pampas de las regiones de Arica y Parinacota, y específicamente en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, se presenta un aumento importante de las temperaturas medias anuales, llegando hasta los 5°C, concordando con lo expuesto por Sarricolea y Romero en su investigación del año 2015. En tanto la zona prealtiplánica y altiplánica presentarán aumentos importantes, sobre todo en la cuenca alta del río Loa, donde el aumento de la temperatura condicionará la presencia de los bofedales y vegas en ésta área.

Figura 32. Temperatura media anual BIO1



b) Temperatura del mes más cálido (BIO 5)

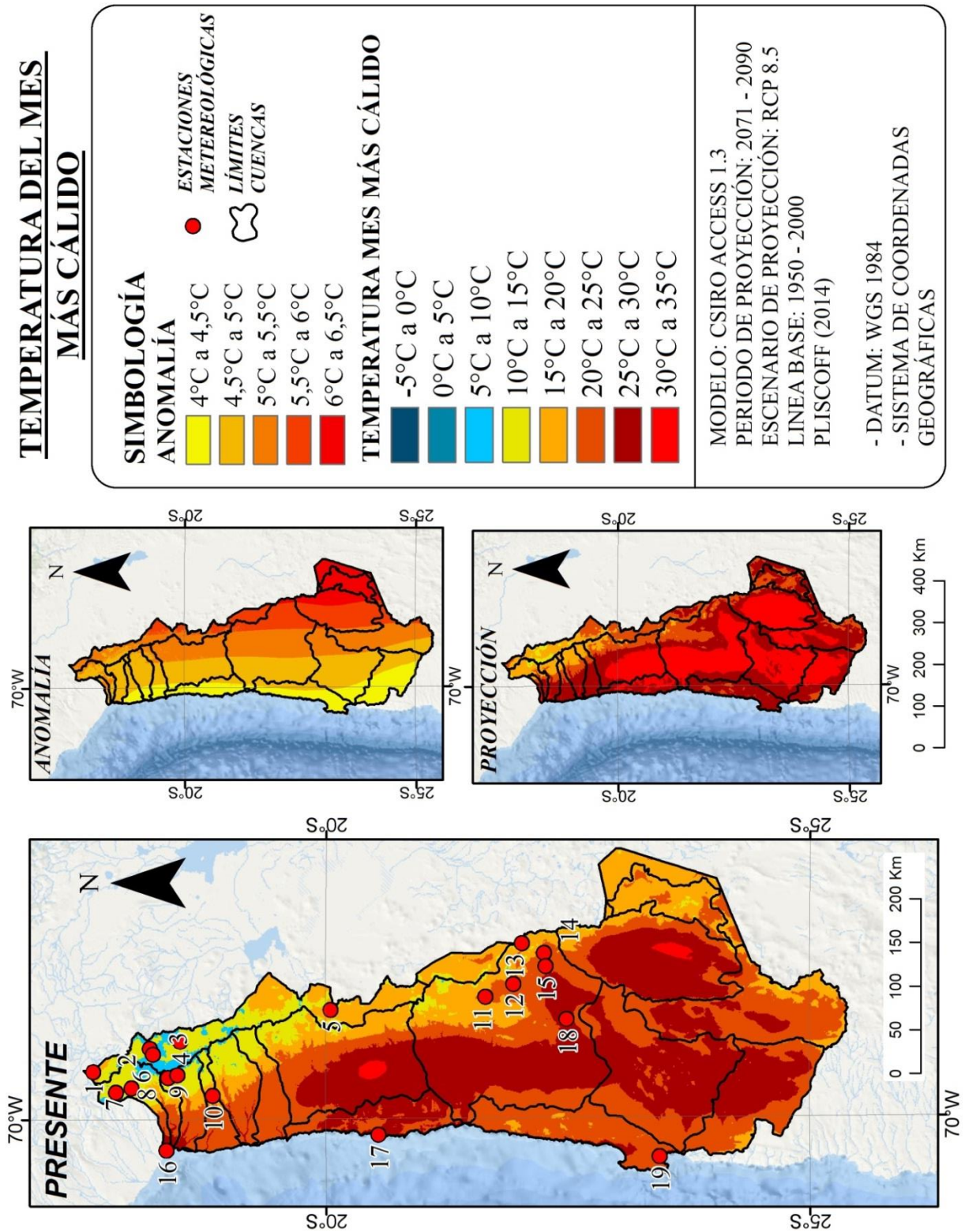
El norte grande y el Altiplano Chileno, presentan concordantes a su condición climática intertropical, donde la presencia del Desierto de Atacama se hace notar, sobre todo con las altas temperaturas que registra en el mes más cálido.

Analizando la distribución de las temperaturas entre la costa, valles y quebradas y pampa desértica, es en esta última donde se presentan las más altas temperaturas distribuyéndose entre los 25° C y los 30°C, teniendo incluso algunas zonas como la pampa del tamarugal y la cuenca del Salar de Atacama donde estas temperaturas alcanzan los 35°C. Mientras tanto, en la precordillera y el altiplano las temperaturas del mes más cálido disminuyen considerablemente con respecto a la franja anterior, mostrando rangos que van desde los 10°C a los 15°C en la puna húmeda en la región de Arica y Parinacota, para luego ir aumentando hasta los 20°C en la puna seca en las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Esta última región presenta temperaturas similares en toda su extensión distribuyéndose entre los 20°C hasta los 30°C, siendo de las tres regiones analizadas la que presenta las temperaturas más altas en el mes más cálido.

Con respecto a la anomalía, tal como muestra la figura 33, las temperaturas del mes más cálido se distribuyen de manera altitudinal de oeste a este, donde las bajas se presentan en el sector costero, debido a la presencia del océano pacífico y a la corriente de Humboldt que hacen que las temperaturas no tengan un aumento acelerado; mientras que las más altas se concentran en la zona altiplánica de la región de Antofagasta llegando hasta los 6,5°C de aumento.

Así, la proyección para el período 2071 – 2090 muestra un norte grande y altiplano con aumento importante de las temperaturas en el mes más cálido en el peor escenario RCP 8,5. Los cambios más importantes se evidencian en la puna húmeda, donde las temperaturas aumentan entre 4°C y 5°C, poniendo en serio peligro la conservación de los humedales, bofedales y vegas en la zona. Avanzando latitudinalmente la puna seca (regiones de Tarapacá y Antofagasta) presenta un aumento importante de las temperaturas en el mes más cálido, siendo este aumento más evidente en la región de Antofagasta, siendo la región que presenta un comportamiento casi homogéneo de las temperaturas abarcando desde los 25 ° C hasta los 35 ° C. El desierto de Atacama marca su presencia en las regiones anteriormente mencionadas. Su influencia en la pampa central se denota con las altas temperaturas que presenta, llegando incluso a la costa en la desembocadura del río Loa.

Figura 33. Temperatura del mes más cálido BIO5



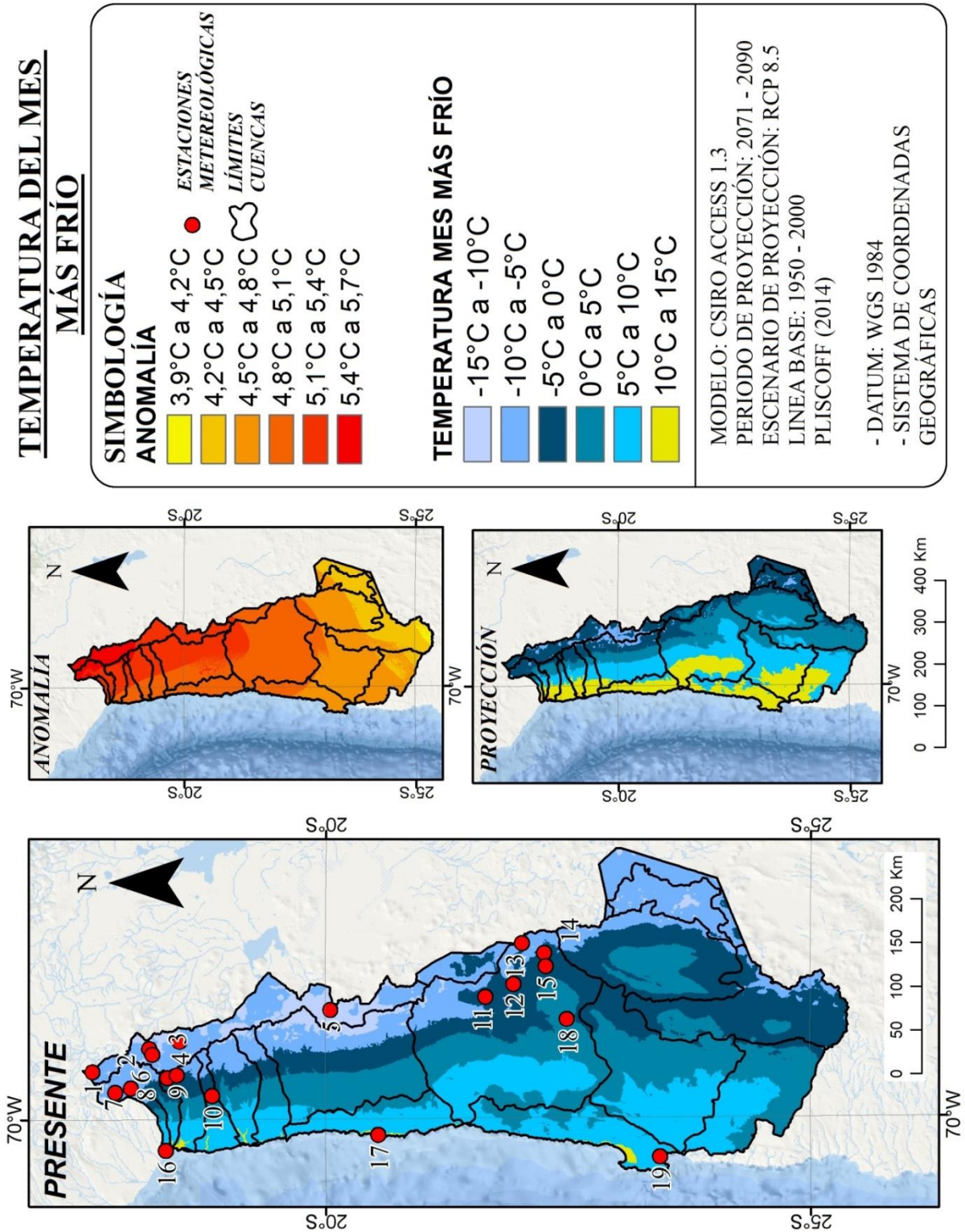
c) Temperatura del mes más frío (BIO 6)

Las temperaturas del mes más frío en el área de estudio, corresponden a los meses de junio, julio y agosto, donde en la zona se hacen sentir temperaturas bajo los 0°C. Actualmente el norte grande y el altiplano chileno, presentan mínimas que van aumentando a medida que descendemos en altura, siendo la costa donde se presentan las temperaturas más altas bordeando entre los 10°C y los 15°C. A medida que nos desplazamos hacia el este, las temperaturas van disminuyendo encontrándose entre los 5°C y los -5°C entre los valles, quebradas y pampa desértica del área de estudio. Mientras tanto en la precordillera y el altiplano las temperaturas mínimas alcanzan sus rangos más bajos distribuyéndose entre los -15°C y los 0°C. Cabe mencionar que el sector con las temperaturas más frías corresponden al sector del Salar de Huasco, en la región de Tarapacá, tal y como se aprecia en la figura 34.

Con respecto a la anomalía, en la figura 34 se aprecia como las temperaturas más frías tendrán un aumento, sobre todo hacia el norte del área de estudio, correspondiendo a la puna húmeda y parte de la puna seca, en las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá respectivamente. Este aumento de las temperaturas en el mes más frío corresponde a alzas que van entre los 5°C, y van decreciendo a medida que se avanza latitudinalmente.

De esta manera, los cambios en las temperaturas en el mes más frío en el área de estudio según la proyección para el período 2071 – 2090, en el escenario RCP 8,5; muestra un aumento en las temperaturas del mes más frío por toda la costa del norte grande, abarcando también valles y quebradas y la sección sur de la pampa del Tamarugal, aumento que se verá reflejado en 5°C. La depresión intermedia que corresponde a los sectores de las pampas desérticas, también presentarán un aumento en las temperaturas del mes más frío. Con respecto a la zona precordillerana y altiplánica del área de estudio, ésta presenta variaciones importantes sobre todo en el sector Norte en la región de Arica y Parinacota, donde se evidencia un aumento de la temperatura de 5 °C en toda la puna húmeda, siendo extensivo hacia la puna seca en las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Cabe resaltar la pérdida de las zonas con temperaturas entre los -15°C y los -10°C, lo que sólo demuestra el aumento generalizado de las temperaturas en toda el área de estudio en el escenario menos favorable para el 2080.

Figura 34. Temperatura del mes más frío BIO6



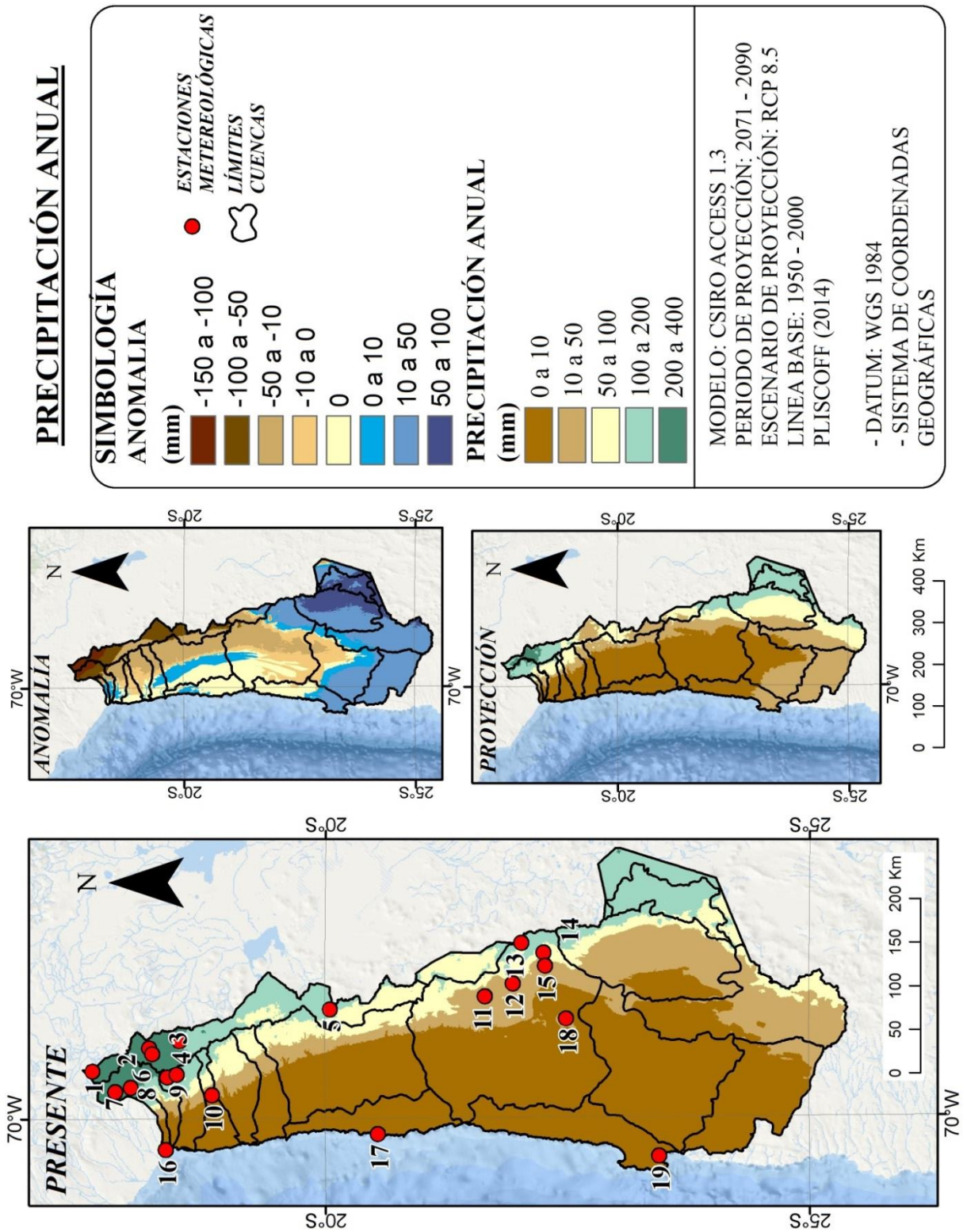
d) Precipitación anual (BIO 12)

La precipitación anual en el área de estudio, refleja la condición climática que impera en ella, un clima desértico con sus diferentes variaciones. Es así, como desde la costa hasta la precordillera de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, presentan un régimen pluviométrico que va desde los 0 a los 10 mm. Avanzando hacia el Este, en los sectores precordilleranos ya se aprecia el aumento de las precipitaciones incrementando de 10 a 50 mm, en una franja delgada que va de norte a sur, coincidiendo su aumento de las precipitaciones latitudinalmente. Hacia el Altiplano las precipitaciones se hacen más frecuentes, sobre todo en los meses estivales donde en el sector norte, en la puna Húmeda llueve entre 200 a 400 mm; disminuyendo a 100 – 200 mm a medida que avanzamos hacia el Sur. (ver figura 35)

Con respecto a la anomalía está presente un comportamiento de la precipitación que muestra el cambio de sus patrones en el futuro. En la puna húmeda se vislumbra una abrupta disminución de estas llegando hasta los 150 mm menos en el sector de Putre y Visviri; y de 100 a 50 mm menos en el sector del Lago Chungará, Lagunas de Cotacotani y en la cuenca del río Lauca. Hacia la costa, de la región de Arica y Parinacota, en los valles y quebradas de Camarones se evidencia un aumento de las precipitaciones de hasta 10 mm, lo que para el sector costero es un aumento importante. En cuanto a la depresión intermedia y la pampa propiamente, también recibe un aumento de las lluvias, sobre todo en el área central que corresponde a la zona de la pampa del Tamarugal. En cuanto a la región de Tarapacá esta presenta sectores donde la variación no se hace presente, y zonas altiplánicas donde la precipitación disminuye de 10 a 50 mm, así como el sector de la pampa del Tamarugal donde se aprecia el incremento de las precipitaciones de 0 a 10 mm. Finalmente, la región de Antofagasta presentaría los mayores aumentos con respecto a las precipitaciones, ya que en la parte central y sur de la región se aprecian aumentos que van desde los 10 a los 50 mm en la costa y depresión intermedia, y de 50 a 100 mm en la precordillera y altiplano de la región.

Así la proyección para el período 2071 – 2090 presenta semejanzas con lo descrito en el párrafo anterior, siendo marcada la diferencia entre los rangos de precipitación en la puna húmeda y la puna seca, sobre todo en la zona de Putre y Visviri y de Coyacagua (estación meteorológica número 5) donde la precipitación disminuye drásticamente. Para el caso de la región de Antofagasta, está presente un aumento de las lluvias hacia el sur de ésta, unido también a las alzas de hasta 200 mm en el altiplano de la región. Un punto a discutir es la presencia de una vasta zona donde las precipitaciones seguirán ausentes, coincidiendo con la pampa desértica.

Figura 35. Precipitación anual BIO12



e) Precipitación del trimestre húmedo (BIO 16)

Similar en colores y rangos pluviométricos a la precipitación anual, la variable bioclimática 16, mide las precipitaciones del trimestre más húmedo, el que para la zona de estudio corresponde a los meses estivales de diciembre, enero, febrero y marzo.

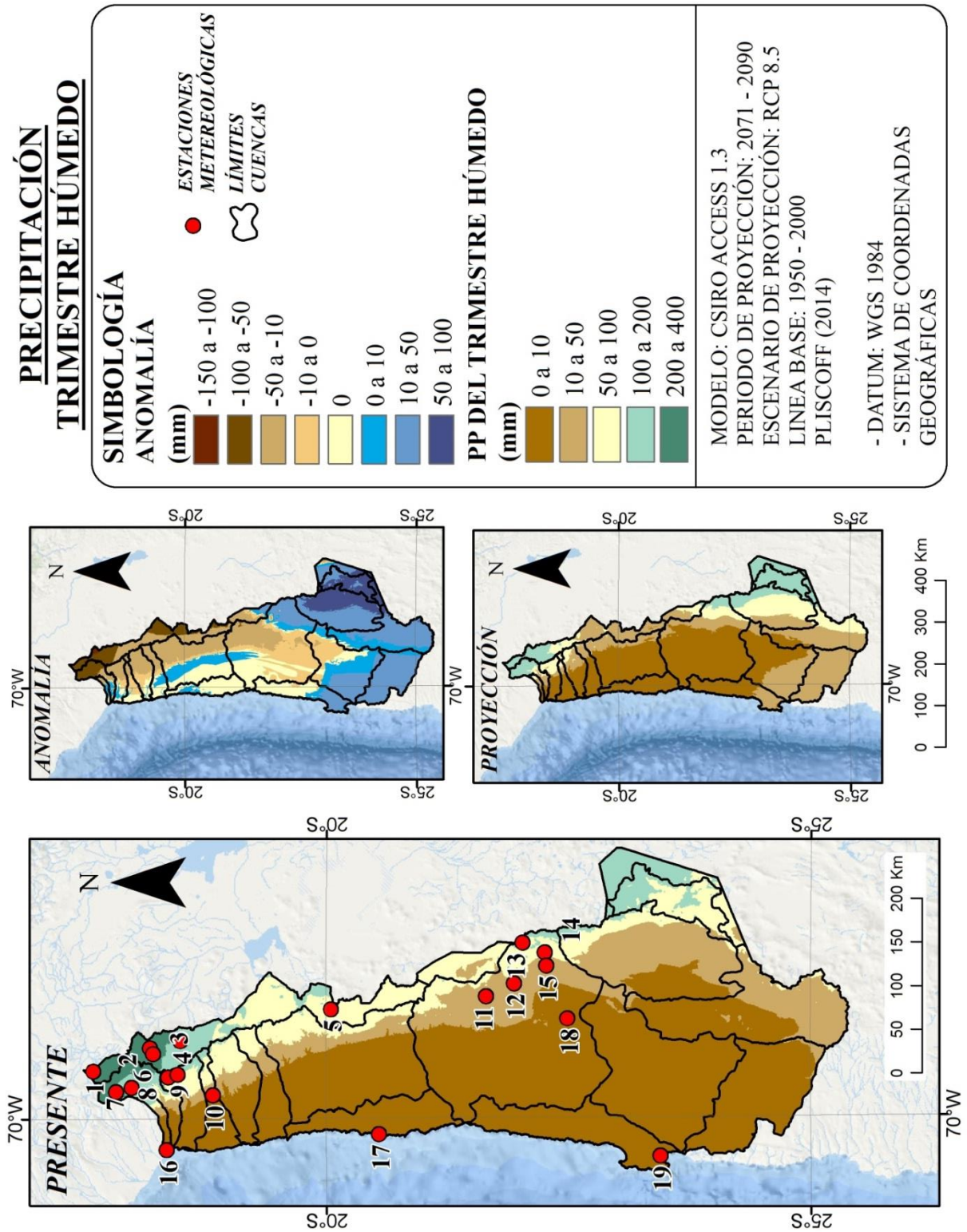
Así en el presente la precipitación se encuentran presente sólo en el Altiplano y las precordilleras que la región en estudio, concentrándose en la puna húmeda y disminuyendo en cantidad y frecuencia a media que avanzan hacia el sur; bajando desde los 400 – 200 mm a 100-50 mm en el sector de la puna seca. Entrando en la precordillera y altiplano de la región de Antofagasta, las precipitaciones en el sector norte de la región siguen el patrón de continuidad de lo observado en la puna seca; sin embargo desde el paralelo 23°S las precipitaciones aumentan de 100 mm a 200 mm, marcando nuevamente el aumento de las lluvias hacia el sur.

La anomalía presenta variaciones similares a la BIO 12, donde los cambios más drásticos se presentan en el sector norte del área de estudio, en el altiplano de las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá, donde la precipitación disminuiría desde los 150 a 50 mm; a la inversa de lo que sucedería en la región de Antofagasta, donde se prevé que la precipitación aumentaría de unos 50 hasta alcanzar unos 100 mm.

Así la proyección para el 2080, en el peor escenario (RCP 8,5) indicaría que las precipitación para el trimestre más húmedo en el norte grande y altiplano chileno tendrían un comportamiento dispar en el altiplano, condicionado por su ubicación entre la puna húmeda y seca, donde la primera enfrentará disminuciones que en a los menos 100 mm en promedio, mientras que la segunda enfrentará la disminución de 50 mm; en el período de lluvias estivales.

Con respecto a los sectores costeros y pampa desértica, mantiene su condición de precipitación escasas de 0 a 10 mm, evidenciando sólo un cambio en este sector, donde al sur del paralelo 23°S las precipitaciones aumentan hasta los 50 mm.

Figura 36. Precipitación trimestre húmedo BIO16



f) Precipitación del trimestre seco (BIO 17)

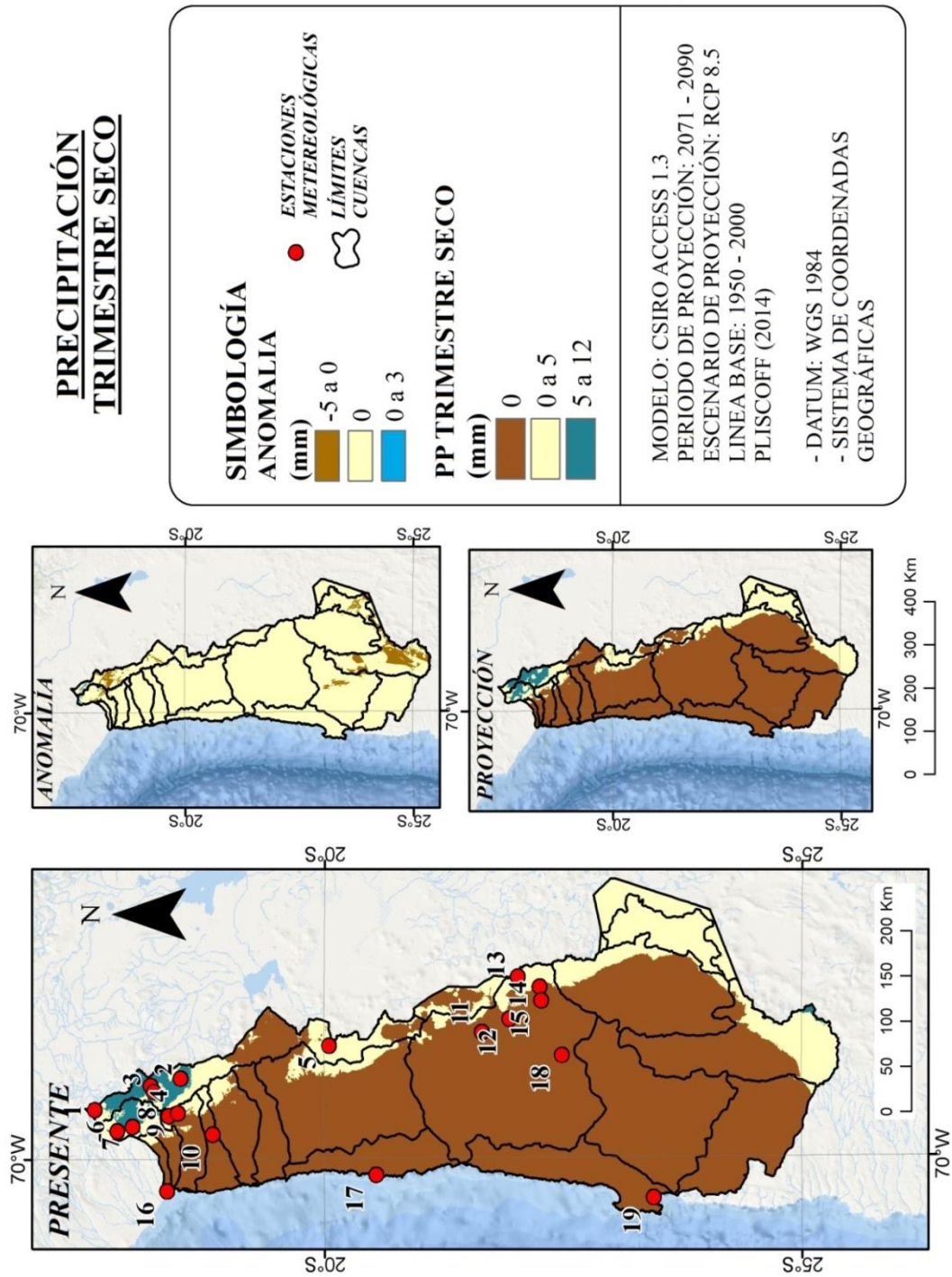
Esta variable climática mide la precipitación en los meses más secos, que para el norte grande y altiplano, corresponderían a los meses de invierno, es decir, junio, julio y agosto, respectivamente.

En la figura 17, se aprecia para el presente un panorama similar para casi toda el área de estudio, donde la precipitación es nula en la costa, valles y quebradas y precordillera, aumentando sólo en algunos sectores altiplánicos, llegando a valores que van desde los 5 a 12 mm, en dicho período. El sector que presenta los valores más altos de lluvia corresponden a las estaciones ubicadas en el extremo norte del área de estudio, en la región de Arica y Parinacota; mientras que al Sur de esta región (Tarapacá y Antofagasta respectivamente), las precipitaciones se presentan de manera esporádica, alcanzando valores de con una máxima de 5 mm.

La anomalía muestra un área de estudio donde en casi su totalidad no presentará mayores variaciones en cuanto a las precipitaciones, manteniéndose en los rangos nulos de esta; salvo una áreas ubicadas tanto al norte como al sur del altiplano de las regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta, donde las lluvias en el trimestre seco tendrán una baja de -5 a 0 mm, evidenciando que llovería menos que en la actualidad.

Así la proyección para el año 2080, en el escenario radiativo 8,5, se presenta sin mayores variaciones en cuanto a las precipitaciones en la actualidad, denotando que los cambios esperados en cuanto a las lluvias no presentarán cambios significativos.

Figura 37. Precipitación trimestre seco BIO17



CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Discusión

El norte grande y el altiplano chileno es un área de gran incertidumbre en lo que respecta a los cambios futuros que pueda presentar, debido a las alzas de temperatura y a la variabilidad en las precipitaciones que se presentan en la zona. La presencia del desierto más árido del mundo – Desierto de Atacama - , el río más largo de Chile, que lo cruza de este a oeste – El Loa – y humedales, vegas y bofedales altiplánicos; hacen de esta zona un área con potencial investigativo, sobre todo en el área climática y biogeográfica. Es así como la principal directriz de esta investigación es el *Analizar tendencias climáticas actuales y sus proyecciones (en las precipitaciones y temperaturas), identificando áreas de diferente sensibilidad al cambio climático para finales del siglo XXI*, buscó develar cuan presente está dicho cambio climático y como ha afectado y afectará éste al área en cuestión.

Las estaciones meteorológicas fueron uno de los principales cimientos investigativos, ya que sin sus datos no se habría logrado caracterizar e identificar tendencias en cuanto a las lluvias y temperaturas en el norte grande y altiplano chileno, siendo comparadas según ubicación y datos contenidos, los que permitieron diferenciar zonas con mayores y menores lluvias y temperaturas.

De esta manera, los resultados obtenidos en la investigación, dan a conocer una realidad interesante para el norte de Chile donde se vislumbra lo siguiente:

1. Disminución de las precipitaciones casi todo el Altiplano Andino
Los datos analizados para el período 1970 – 2013, muestran que las lluvias han descendido en gran parte del área de estudio. Tal es el caso de las estaciones de Lequena, Guallatire y Visviri que en un período de 30 años, la tendencia mostró que las precipitaciones en dichas estaciones descendieron en 132mm, 106 mm y 84 mm respectivamente. (Ver gráficos 23, 31 y 28).
2. Aumento de las precipitaciones en estaciones de valles y quebradas
En el análisis secular de los datos, mostró un leve aumento de las precipitaciones en las estaciones ubicadas en los valles y quebradas de la región de Arica y Parinacota. La tendencia mostró que en treinta años los montos de agua caída experimentaron un leve aumento en las estaciones de Belén con 11 mm y Codpa con 6,8 mm. (Ver gráficos 18 y 22).
3. Aumento de las precipitaciones en el extremo sur del Altiplano
La estación de Inacaliri es la única estación que mostró un aumento en las precipitaciones según lo mostró la tendencia para 30 años, donde se evidencia un incremento en 29,9 mm. (Ver gráfico 33)
4. Temperaturas Mínimas
Las temperaturas mínimas durante el período 1970 – 2013 presentaron un aumento en la precordillera y la costa del norte grande. Así lo demostraron las estaciones de El Loa y Chacalluta, donde el aumento según la tendencia en treinta años corresponde a 1,5 °C y 0,7°C respectivamente. (Ver gráficos 14 y 1)
Con respecto al Altiplano, la temperatura mínima disminuye durante el período 1970 – 2013. La estación Parshall arroja en su tendencia a 30 años, que dichas temperaturas han descendido 2, 2°C (ver gráfico 12).
5. Temperaturas Máximas

Las temperaturas máximas en los años analizados, mostraron un aumento en los valles y quebradas de la región de Arica y Parinacota, mientras que en la costa la situación es la inversa disminuyendo. Esto se ejemplifica con los valores arrojados por las estaciones de Codpa (valle) y Chacalluta (costa), las que mostraron un aumento y disminución en sus valores en la tendencia en 30 años, donde el aumento equivale a 1°C y la disminución es de 0,8°C, respectivamente (ver gráficos 10 y 2)

6. Teleconexiones

Dentro de las variabilidades de baja frecuencia estudiadas, todas hacen referencia a que los períodos donde se presentan las lluvias en el altiplano, son en la fase fría del ENSO, la Niña, concentrándose hacia el norte del área de estudio y disminuyendo hacia el sur. En la costa del área de estudio, las lluvias se presentan en fases cálidas del ENSO, El Niño, haciéndose más intensas hacia el sur.

7. Cambios esperados para el 2080 según modelo de circulación global Csiro Access 1.3

Las proyecciones futuras para el norte grande y altiplano del norte de Chile, muestran un aumento en las temperaturas generalizado de hasta 5°C en el peor escenario, RCP 8,5. Con respecto a las precipitaciones, estas disminuyen en el extremo norte del altiplano, siendo el sector de la puna húmeda la más comprometida con una disminución de hasta 150 mm. En la costa, valles y en la pampa del Tamarugal se evidencia un aumento de las precipitaciones de hasta 10mm, el cual se hace más persistente hacia el sur en la región de Antofagasta.

Los resultados que arrojó la investigación dejan entre ver que las temperaturas y las precipitaciones tienen un comportamiento diferente en la costa del norte grande. Mientras las precipitaciones en estas zonas han tenido un ligero aumento en los 43 años estudiados, las temperaturas, sobre todo las máximas han disminuido, siendo un caso interesante de destacar, ya que se presenta como un hecho excepcional.

Todos estos datos pueden ser comprobados y validados gracias a las investigaciones realizadas por (Sarricolea & Romero, 2015) y (Vuille, et al., 2015), quienes en sus documentos señalan el aumento de las temperaturas en el Altiplano, y el enfriamiento de la costa, debido a una desaceleración del cambio climático, conocido como Hiatus. Estos documentos son un respaldo importante a la investigación, pues muestran que los datos entregados tienen relación con otros estudios, mostrando a los investigadores que los cambios que se esperan en el extremo Norte del país son convergentes; ya están sucediendo y son comprobados por los autores en sus investigaciones.

Sarricolea y Romero (2015) muestran los cambios en las dos primeras regiones, y sobre todo en Altiplano, suponiendo un aumento de la aridez en esta zona, presionando los recursos hídricos subterráneos, tan sobrexplotados en estas regiones. Además coincide que esta región es altamente sensible al cambio climático, lo que queda demostrado con las proyecciones de los cambios futuros.

Vuille et al. (2015) destaca la contribución de la fase fría de la PDO y como esta puede explicar la presencia del Hiatus Global a partir del último ENSO El Niño fuerte (1997-1998), evidenciando que durante los últimos 30 años se presenta un enfriamiento significativo en la costa, lo que nuevamente coincide con los datos presentados en este documento.

De seguir con estos cambios, sobre todo en la costa y el Altiplano de la región de Antofagasta, se presentarán con mayor frecuencia eventos climáticos como los acontecidos en

marzo del 2015, donde las abundantes precipitaciones y la falta de una buena planificación urbana, se conjugaron mostrando una realidad olvidada por los habitantes de estos lugares. Es posible que estos eventos pluviométricos intensos y alzas de temperaturas sean cada vez más frecuentes, siendo primordial educar y concientizar a las comunidades que se encuentran en áreas sensibles a estos cambios, para que estén prevenidas ante cualquier evento meteorológico. Estos cambios deberían ser analizados y estudiados en futuras investigaciones que abarquen la gestión del riesgo por eventos termopluviométricas en el norte grande y altiplano

El Cambio Climático afecta desigualmente los territorios, por lo tanto, hay áreas más susceptibles a sus efectos negativos y otras “beneficiadas” por ella. En la banda latitudinal del área de estudio existe un aumento generalizado de las temperaturas, lo cual es palpable en las series climáticas y modelos. Ahora bien, respecto a las precipitaciones la situación es muy distinta, pues gran parte de Bolivia, Argentina, Brasil aumentan sus precipitaciones, y en altiplano y el chaco disminuyen (IPCC, 2013)

El efecto humano sobre el Cambio Climático es extremadamente probable (95%), y no discrimina áreas protegidas (Parque Nacional ni Reservas). Por ello sus condiciones presentes y futuras se verán afectadas, no tan solo en la conservación de la biodiversidad, sino que también en la disponibilidad del recurso hídrico tan necesario e importante para las comunidades altiplánicas, zonas urbanas y las actividades económicas presentes en esta zona.

Así los cambios y variabilidad climática en el altiplano andino han presentado históricamente características diferentes según las escalas en que sean analizados, y por ello sus efectos sobre los recursos naturales y el medioambiente son diferentes a escala regional y local, en el corto, mediano y largo plazo.

Para finalizar y a modo de comentario, la mayor dificultad que presentó esta investigación fue la adquisición de datos fiables y que se mantuvieran en por períodos extensos. Si bien es cierto la DMC y DGA poseen estaciones meteorológicas en gran parte del norte grande y altiplano chileno, muchas de estas estaciones contaban con vacíos en meses, días y años, haciendo dificultoso el análisis y procesamiento de los datos, motivo por el cual no se obtuvieron resultados más precisos sobre ciertas zonas, como el altiplano de la región de Tarapacá, donde los dos datos de estaciones analizadas fueron las estaciones de Coyacagua y Diego Aracena, dejando sectores como la pampa del Tamarugal y los oasis de Pica, Mamiña y Camiña, sin datos para comparar y conocer el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas en estas zonas

5.2. Conclusiones

El cambio climático es “una amenaza apremiante y con efectos potencialmente irreversibles” para la humanidad y el planeta. Lo anterior fue una de las sentencias más importantes de la XXI Conferencia sobre el Cambio Climático (COP21, 2015), donde los mandatarios de 195 países lograron un histórico acuerdo sobre la reducción del CO₂, poniendo de relieve con grave preocupación la necesidad urgente de resolver el importante desfase que existe entre el efecto agregado de las promesas de mitigación de las Partes, expresado en términos de las emisiones anuales mundiales de gases de efecto invernadero en el año 2020, y las trayectorias que deberían seguir las emisiones agregadas para poder mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y de seguir esforzándose por limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C (ONU, 2015).

Con la COP21, se deja de manifiesto que el cambio climático es una realidad, siendo una de las principales amenazas mundiales, afectando de sobremanera a aquellos ecosistemas vulnerables, adaptados a condiciones climáticas extremas, tal y como los ubicados en el norte grande y altiplano chileno.

En esta investigación se buscó analizar las tendencias climáticas y sus proyecciones tanto en temperatura como en precipitación en el norte grande y el altiplano chileno, identificando las áreas sensibles a este cambio, para fines del siglo. Dentro de los principales hallazgos se evidencia la presencia de un cambio importante en las precipitaciones en toda la zona estudiada, disminuyendo de manera drástica en las estaciones ubicadas en el extremo norte, afectando fundamentalmente a los humedales y bofedales ubicados en este extremo, afectando sobre todo al Parque Nacional Lauca ,

Las temperaturas también ven un aumento en 1,5°C desde 1970 al 2013, y las proyecciones para el 2080 muestran aumentos de hasta 5°C en el Altiplano, siendo coincidentes con lo proyectado el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático en el 2013 y por lo investigado por Sarricolea & Romero (2015), lo cual implica la necesidad imperante frenar las emisiones de carbono a la atmosfera, impidiendo que estos escenarios tan nefastos se produzcan.

Las variabilidades de baja frecuencia seguirán afectando los regímenes de agua caída en el norte grande, indicando un desplazamiento de las lluvias hacia el sur de la región de Antofagasta. El Monzón Sudamericano seguirá condicionando en gran medida las precipitaciones en el altiplano chileno, vinculado siempre con la incidencia del ENSO La Niña en el Océano Pacífico y de la Oscilación Decadal del Pacífico en su fase fría.

El norte grande y altiplano chileno presenta áreas fascinantes de ser estudiadas, investigadas y analizadas. La variabilidad en las precipitaciones, y el aumento de las temperaturas ponen a esta zona en la mirada de futuras investigaciones que potencien la preservación y cuidado de los ecosistemas presentes en ella. Cuencas como la de los ríos Lauca y Loa, se verán afectadas de sobremanera, ya que son las cuencas más afectadas con las mermas en los montos de agua caída y el aumento de las temperaturas, unido a su alta intervención antrópica.

Finalmente esta investigación buscaba refutar o aseverar que las precipitaciones y las temperaturas en el norte grande y altiplano chileno iban a disminuir y aumentar respectivamente, configurando áreas más sensibles al cambio Climático proyectado al 2080, lo que se comprobó de manera fehaciente.

El planeta Tierra ha experimentado el cambio más importante en todo sus 4.500 millones de años, un cambio que ha sido provocado en su totalidad por el afán inescrupuloso del ser

humano, con el sólo fin de enriquecer sus naciones, sin pensar en el bienestar de la flora, fauna y generaciones futuras que no tendrán oportunidad alguna de remediar este cambio tan profundo. Nuestro planeta es uno sólo, es nuestro y como tal lo debemos cuidar. Tenemos ecosistemas hermosos, únicos en una zona desértica, donde la sabia naturaleza encontró la manera de entregar vida. No permitamos que estos parajes se pierdan, enfrentemos este cambio con miras hacia el futuro, eduquemos, preservemos y cuidemos este lugar, no esperemos que se pierdan como lo que le pasó al humedal de Lagunillas en la región de Tarapacá.

Bibliografía

Aceituno, P., 1993. *Aspectos Generales del Clima en el Altiplano Sudamericano..* Arica, Chile, Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplanicos, pp. 63-69.

Aceituno, P., 1996. Elementos del Clima en el Altiplano Sudamericano. *Revista Geofísica*, Issue 44, pp. 43 - 55.

Aceituno, P. & Montecinos, A., 1993. Análisis de la Estabilidad de las relación entre la oscilación del Sur y la precipitación en América del Sur. *Bull. Inst. Fr. Études andines*, Issue 22, pp. 53 - 64.

Alfaro, J. & Amador, E., 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, Volumen 11, pp. 39 - 52.

Andreoli, R. & Kayano, M., 2005. ENSO-Related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. *International Journal of Climatology*, 25(15), pp. 2017 - 2030.

ArcGis & Resources, 2013. [www.arcgis.com](http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html). [En línea] Available at: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html> [Último acceso: 2015 octubre 24].

Ashok, K. & Yamagata, T., 2009. The El Niño with a difference. *Nature*, Volumen 461, pp. 481 - 484.

Barry, R. & Chorley, R., 1999. *Atmósfera, tiempo y clima*. 7ma. ed. Barcelona, España: Omega.

Bernhardson, W., 1985. El Desarrollo de recursos hidrológicos del Altiplano Ariqueño y su impacto en la economía ganadera de la zona.. *Chungará, Universidad de Tarapacá*, Issue 14, pp. 169-181.

Börgel O, R., 1984. *Geomorfología. Geografía de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.

Bridgman, H. A. & Oliver, J., 2006. *The global climate system: Patterns, Processes and Teleconnections..* primera ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Bridgman, H. & Oliver, J., 2006. "The global climate system: Patterns, Processes and Teleconnections". s.l.:s.n.

CEPAL, 2009. *CEPAL*. [En línea] Available at: <http://www.cepal.org/es/publicaciones/2974-la-economia-del-cambio-climatico-en-america-latina-y-el-caribe-sintesis-2010>[Último acceso: 16 Octubre 2014]. cepa, s.f. [En línea].

Christensen, J. a., 2013. *Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: s.n.

Chuvieco, E., 2000. *Teledetección Ambiental*. 3º ed. Barcelona, España: Ariel S.A..

CONAF, 2010. *Programa Nacional para la Conservación de Humedales isótermos en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado*, Santiago, Chile: s.n.

DGA, 2004. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Río Lauca*, Santiago, Chile: s.n.

Diaz, H. & Markgraf., V., 2000. *“El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale variability and global and regional impacts”*. New York: Cambridge University Press,.

Gana, C., 2012. Discusión sobre los años que viene desde el punto de vista climático.. *Consejo de la SNA*.

Garduño, R., 1994. *El Velidoso Clima*. Primera Edición ed. Mexico D.F.: Fondo de Cultura Económica, Biblioteca Digital..

Garreaud, R., 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro - INIA*, Issue 93, pp. 1 - 14.

Garreaud, R., Ville, M., Compagnucci, R. & Marengo, J., 2009. Present-day South American climate. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, Issue 281, pp. 180-195.

Garreaud, R., Viulle, M., Compagnucci, R. & Marengo, J., 2008. *Departamento de Geografía Física, Universidad de Chile*. [En línea] Available at: http://www.dgf.uchile.cl/rene/PUBS/ClimSA_paleo3.pdf [Último acceso: 14 Junio 2014].

Gutierrez, A., 2012. *Probabilidad y Estadística*. México D.F: Interamericana.

Houghton, J., Meira, G., Griggs, D. & Maskell, K., 1997. *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación de IPCC*, s.l.: Grupo de Trabajo I del IPCC.

IPCC, 2013. *Resumen para responsables de Políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases Físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos de América: s.n.

Jimenez, M., 2010. *INDICADORES CLIMATICOS. Una manera para identificar la variabilidad*, Mexico, D.F.: INAPESCA.

Kidson, J. W., 1988. Interannual Variations in the Southern Hemisphere Circulation. *Journal Climate*, pp. 1177 - 1198.

Kitoh, A., Kusunoki, S. & Nakaegawa, T., 2011. Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60 km mesh Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI-AGCM). *Journal of Geophysical Research*, 116(D06105), p. 21.

Larraín, S. & P. P., 2010. *Conflictos por el Agua en Chile: Entre los derechos humanos y las reglas del mercado*. Primera ed. Santiago, Chile: s.n.

Li, J. & Zeng, Q., 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic and Environmental Research*, 10(3), pp. 351-365.

Luebert, F. & Pliscoff, P., 2006. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Primera ed. Santiago: Universitaria.

Luebert, F. & Pliscoff, P., 2012. Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso. *Investigaciones Geográficas*, 1(44), pp. 41-56.

Madaleno, I. & G. A., 2007. Usos conflictivos del Agua en el Norte de Chile.. *Boletín de la A.G.E.*, Issue 45, pp. 345 - 372.

Manterola D, C. & Pineda N, V., 2008. <http://www.scielo.cl/>. [En línea] Available at: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S0718-40262008000100018&lng=es&tlng=es [Último acceso: 25 Octubre 2015].

Martín-Vide, J., 2003. *El Tiempo y El Clima*. primera ed. Barcelona: Rubes.

Martín-Vide, J., 2009. Diez verdades y diez mentiras en relación al Cambio Climático. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), pp. 120-127.

Maturana, J., Bello, M., Manley & M, 2004. Antecedentes Históricos y descripción del Fenómenos del Niño, Oscilación del Sur.. En: J. Avaria, J. Rutlland & E. Yáñez, edits. *El Niño - La Niña 1997 - 2000. Sus efectos en Chile*. Valparaíso: CONA, pp. 13 - 27.

McKee, T. y o., 1995. *Drought monitoring with multiple time scales*. Anabeim, California, Preprints of the 9th Conference on Applied Climatology., pp. 179 - 184.

Méndez, M., Romero, H. & Sarricolea, P., 2012. *Vulnerabilidad social en el Desierto de Atacama. Aluviones del 13 marzo 2012. Quebrada de Camiña, Chile*.. Arequipa, Perú, s.n.

Mendonça, M., 2013. *Monzón Sudamericano: La intergración de la circulación amazónica y altiplánica, y la variabilidades climáticas del Altiplano Andino Chileno*. Arequipa, s.n.

MMA, 2011. *Guía para la conservación y seguimiento ambiental de Humedales Andinos*.. Primera ed. Santiago: s.n.

Montealegre, J. & Pabon, J., 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño - La Niña- Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, Issue 2, pp. 7 - 21.

Muruá, R., González, L. & Lima, M., 2003. *Facultad de Ciencias Biológicas*. [En línea] Available at: <http://www.bio.puc.cl/caseb/casebpdf/Murua&al.2003.pdf>

ONU, 2013. *Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Nueva York: s.n.

ONU, 2015. *Convención Marco sobre el Cambio Climático, Aprobación Acuerdo de París*. Paris, s.n.

PCMDI, 2008. *Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison*. [En línea] Available at: <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/pcmdi/> [Último acceso: 25 Septiembre 2014].

Pesquer, L., Masó, J. & Ponds, X., 2007. Integración SIG de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas. *Revista de Teledetección*, Volumen 28, pp. 69 - 76.

Plissock, P., Luebert, F., Hilger, H. H., & Guisan, A. 2014. Effects of alternative sets of climatic predictors on species distribution models and associated estimates of extinction risk: A test with plants in an arid environment. *Ecological Modelling*, 288, 166-177.

Price, T., McKenney, D., Caya, D. & Coté, H., 2001. Transient climate change Scenarios for high resolution assesment of impacts on Canada's forest Ecosystems. En: *Report to Climate Change Action Fund*. s.l.:s.n.

Quintana, J. & Aceituno, P., 2008. *Proyecto ACT-19*. [En línea] [Último acceso: 20 junio 2014].

Quintana, J. & Aceituno, P., 2010. Changes in the rainfall regime along the extra-tropical west coast of South America (Chile): 30-43°S. *Atmosfera*, Issue 25, pp. 1-22.

RAMSAR, 2005. *Estrategia Regional de Conservación y Uso sostenible de los Humedales Altoandinos*. En: *Ramsar COP9 DOC 26*. Kampala: s.n.

Risacher, F., Alonso, H. & Salazar, C., 1999. *Estudios de Cuencas de la I región*, Santiago: Convenio DGA - UCN - IRD.

Romero, H., 1985. *Geografía de los Climas*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.

Romero, H., Mendoca, M. & Mendez, M., 2012. Macro y Mesoclimas del Altiplano Andino y Desierto de Atacama: Desafíos y estrategias de adaptación social ante su variabilidad.. *Norte Grande*, p. 24.

Romero, H. & Mendonça, M., 2011. Ondas de frío registradas en invierno de 2010: Necesidad de una perspectiva regional integrada para la climatología Latinoamericana. *Revista Geográfica de América Central*, Issue Número Especial, pp. 1-13.

Rutllant, J., 1990. Cambio Climático y anomalías extratropicales en la Circulación Atmosférica Regional de América del Sur: Una perspectiva ENOS. *Revista Geofísica IPGH*, 13(32), pp. 143-150.

Sandia, L. & Henao, A., 2008. *Observatorio Geográfico América Latina*. [En línea] Available at: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal8/Nuevastecnologias/Sig/01.pdf> [Último acceso: 2 Diciembre 2014].

Sarricolea, P. & Romero, A. H., 2015. Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del Norte de Chile. *Revista Norte Grande*, Volumen 62, pp. 169 - 183.

Sarricolea, P. & Martín-Vide, J., 2012. Distribución Espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm entre 1965-2005. *Publicaciones de la asociación Española de Climatología*, pp. 631-639.

Uribe, J., Cabrera, R., De la Fuente, A. & Paneque, M., 2012. *Atlas bioclimático de Chile*. primera ed. Santiago, Chile: s.n.

Vuille, M. y otros, 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, pp. 1 - 13.

WMO, 2014. *World Meteorological Organization*. [En línea] Available at: http://www.wmo.int/gsearch/gresults_en.html?q=ACCESS+1.3&submit.x=15&submit.y=7&submit=SEARCH#gsc.tab=0&gsc.q=ACCESS%201.3&gsc.page=1https://www.wmo.int/pages/themes/climate/index_en.php# [Último acceso: 26 Septiembre 2014].

WorldClim, 2014. *Worldclim - Global Climate Data*. [En línea] Available at: <http://www.worldclim.org/bioclim> [Último acceso: 25 Septiembre 2014].

Yamagata, T. y otros, 2007. "Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer". [En línea] Available at: http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/publications/Weng_et_al_2007.pdf [Último acceso: 13 11 2014].

Zhao, M. y otros, 2013. Improving Multiweek Rainfall Forecasts: Experimentation with the ACCESS climate models. *National Library of Australia*, Issue 64, p. 44.

Zhou, J. & Lau, K.-M., 1998. Does a Monsoon Climate exist over South America?. *Journal of Climate*, Volumen 11, pp. 1020 - 1040.