

**ANÁLISIS TEMPORAL DEL NIVEL DE AGUA DE LOS LAGOS: TODOS LOS  
SANTOS, LLANQUIHUE, Y RANCO, BASADO EN DATOS SATELITALES.**

Álvaro Marcelo Ortiz Barría



Proyecto de Título presentado al  
Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática  
Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles  
En cumplimiento del requisito parcial  
Para obtener el título de  
**Ingeniero Geomático**

Escrito bajo la orientación del profesor

Dr. Henry Montecino Castro

Aprobado por la comisión

Mg. Aharon Cuevas Cordero

M. Sc. Carolina Bouniot Escobar

Los Ángeles

Abril, 2020.

## RESUMEN

La utilización de datos obtenidos a través de misiones satelitales han tenido una gran participación en estudios geodésicos en los últimos años, como lo es el caso de la altimetría satelital, y otras plataformas orbitales (e.g. *Tropical Rainfall Mission Measuring* (TRMM)) en el monitoreo del nivel del mar, clima, ciclo hidrológico, entre otras. El monitoreo de nivel de agua en lagos se realiza generalmente con estaciones de monitoreo *in-situ*. No obstante, existen otras alternativas basadas en plataformas satelitales altimétricas para determinar el nivel de agua, independientemente de las condiciones meteorológicas de la zona de interés. Por otro lado, la variación del nivel de aguas de los lagos pueden ser afectados por conductores climáticos (e.g. El Niño Oscilación Sur (ENSO)) de forma anual o interanual. Chile, pese a tener más de 15000 lagunas y lagos, el monitoreo del nivel de aguas no ha sido observado con otras técnicas de manera oficial, por lo que las plataformas satelitales pueden abarcar estos estudios.

En este contexto, este estudio logró determinar la relación entre el nivel de agua de los lagos Todos Los Santos, Llanquihue y Ranco, y conductores climáticos entre los años 2002 y 2018, dando como resultado que los periodos de crecida y estiajes de los lagos presentan una tendencia positiva con el aumento de actividad del fenómeno ENSO. Se analizó la variación lineal mediante un análisis de tendencia; mediante la Transformada Discreta de *Fourier* se realizó un análisis cíclico. Además, se correlacionó el nivel de agua de los lagos con variables climáticas como precipitaciones y temperaturas, y el índice ONI.

Palabras clave: Altimetría Satelital, TRMM, El Niño Oscilación del Sur (ENSO), precipitación, temperatura, series temporales.

## DEDICATORIA

*A mi madre, Lorena, quien me ha apoyado incondicionalmente en todos los momentos de mi vida, en mis metas y proyectos, y especialmente en mi etapa universitaria, que pese a tener altos y bajos siempre confió en mí como nadie más lo hizo, y estuvo presente desde el primer hasta el último día .*

*Gracias mamita...*



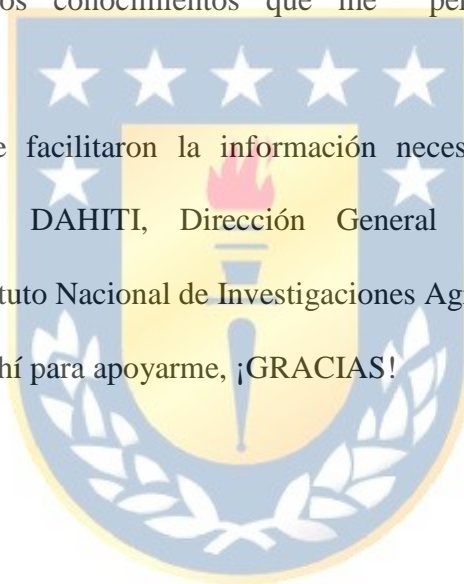
## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecer a mi madre por el constante y fundamental apoyo en esta etapa; también a Maricela, Yerko, Cristian, y Mirko, quienes me dieron apoyo y amistad en este camino.

A mi profesor guía Dr. Henry Montecino, por su constante apoyo, paciencia, y por guiarme para lograr nuevos conocimientos que me permitieron realizar esta investigación.

A las instituciones que me facilitaron la información necesaria para realizar este proyecto: NASA, NOAA, DAHITI, Dirección General de Aguas, Dirección Meteorológica de Chile, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

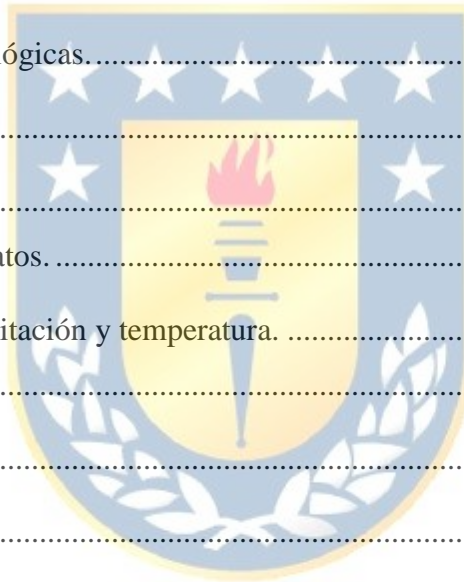
A Todos los que estuvieron ahí para apoyarme, ¡GRACIAS!



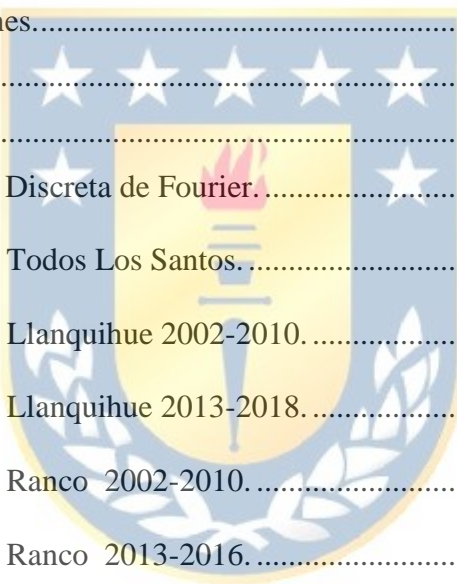
## Índice de Contenidos

RESUMEN .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
Lista de Tablas .....	viii
Lista de Figuras .....	x
Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones .....	xiii
1. Introducción .....	1
1.1. Objetivo General. ....	3
1.2. Objetivos Específicos. ....	3
2. Revisión Bibliográfica. ....	4
2.1. Generalidades. ....	4
2.1.1. Importancia del monitoreo de nivel de aguas de lagos. ....	4
2.1.2. Institución encargadas del monitoreo lacustre en Chile. ....	4
2.2. Técnicas de medición de nivel de aguas. ....	5
2.2.1. <i>In-situ</i> . ....	5
2.2.2. Altimetría satelital. ....	6
2.3. El Niño Southern Oscillation (ENSO). ....	7
2.4. Relación de la variabilidad de nivel de agua de lagos con conductores climáticos. ....	9
2.5. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). ....	10
2.5.1. Investigación relacionada con el clima. ....	10
2.6. Series Temporales. ....	12
2.6.1. Análisis de tendencias. ....	12
2.6.2. Análisis Espectral. ....	13

3.	Área de Estudio.....	15
3.1.	Lago Ranco.....	15
3.2.	Lago Llanquihue.....	16
3.3.	Lago Todos Los Santos.....	17
4.	Datos.....	18
4.1.	Niveles de agua basados en datos de altimetría satelital.....	18
4.2.	Precipitación desde datos satelitales.....	21
4.3.	Estaciones pluviométricas.....	22
4.4.	Estaciones Meteorológicas.....	24
4.5.	Datos ENSO.....	26
5.	Metodología.....	28
5.1.	Procesamiento de datos.....	29
5.1.1.	Datos de precipitación y temperatura.....	29
5.2.	Series Temporales.....	30
5.3.	Análisis Espectral.....	31
5.4.	Correlación.....	32
6.	Resultados.....	33
6.1.	Series Temporales de Altimetría.....	33
6.1.1.	Lago Ranco 2002-2010.....	33
6.1.2.	Lago Ranco 2013-2018.....	36
6.1.3.	Lago Llanquihue 2002-2010.....	38
6.1.4.	Lago Llanquihue 2013-2016.....	41
6.1.5.	Lago Todos Los Santos 2002-2018.....	43
6.2.	Periodogramas.....	46
6.2.1.	Lago Todos Los Santos.....	46
6.2.2.	Lago Llanquihue 2002-2010.....	47



6.2.3.	Lago Llanquihue 2013-2016.....	47
6.2.4.	Lago Ranco 2002-2010.....	48
6.2.5.	Lago Ranco 2013-2018.....	48
6.3.	Correlaciones.....	50
6.3.1.	Correlaciones Lago Todos Los Santos. ....	50
6.3.2.	Lago Llanquihue 2002-2010.....	52
6.3.3.	Lago Llanquihue 2013-2016.....	53
6.3.4.	Lago Ranco 2002-2010.....	55
6.3.5.	Lago Ranco 2013-2018.....	56
7.	Conclusiones y discusiones.....	59
8.	Referencias.....	61
9.	Anexos .....	67
9.1.	Script Transformada Discreta de Fourier.....	67
9.2.	Periodogramas Lago Todos Los Santos.....	69
9.3.	Periodogramas Lago Llanquihue 2002-2010.....	71
9.4.	Periodogramas Lago Llanquihue 2013-2018.....	73
9.5.	Periodogramas Lago Ranco 2002-2010.....	76
9.6.	Periodogramas Lago Ranco 2013-2016.....	78



## Lista de Tablas

<i>Tabla 1: Características de productos TRMM obtenidos para lagos en estudio.</i>	21
<i>Tabla 2: Estaciones pluviométricas utilizadas.</i>	22
<i>Tabla 3: Estaciones de temperatura utilizadas.</i>	24
<i>Tabla 4: Datos ONI. Años y meses de ocurrencia de El Niño en rojo, La Niña en azul, y neutro en negro. Fuente: CPC/NOAA, 2019.</i>	27
<i>Tabla 5: Clasificación ONI según Terassi et al.</i>	27
<i>Tabla 6: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Ranco. 2002-2010.</i>	34
<i>Tabla 7: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Ranco. 2002-2010.</i>	34
<i>Tabla 8: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Ranco. 2013-2018.</i>	36
<i>Tabla 9: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Ranco. 2013-2018.</i>	36
<i>Tabla 10: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Llanquihue. 2002-2010.</i>	38
<i>Tabla 11: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Llanquihue. 2002-2010.</i>	38
<i>Tabla 12: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Llanquihue. 2013-2016.</i>	41
<i>Tabla 13: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Llanquihue. 2013-2016.</i>	41
<i>Tabla 14: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Todos Los Santos. 2002-2018.</i>	43
<i>Tabla 15: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Todos Los Santos. 2002-2018.</i>	43
<i>Tabla 16: Frecuencias Predominantes. Lago Todos Los Santos. 2002-2018.</i>	46
<i>Tabla 17: Frecuencias Predominantes. Lago Llanquihue. 2002-2010.</i>	47
<i>Tabla 18: Frecuencias Predominantes. Lago Llanquihue. 2013-2016.</i>	47
<i>Tabla 19: Frecuencias Predominantes. Lago Ranco. 2002-2010.</i>	48

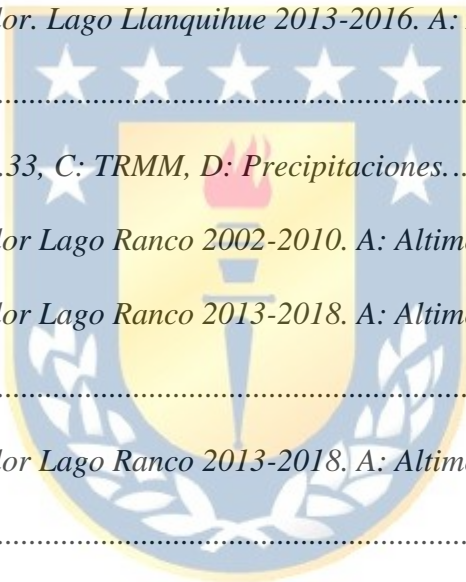


<i>Tabla 20: Frecuencias Predominantes. Lago Ranco. 2013-2018.</i> .....	48
<i>Tabla 21: Resultados estadísticos de variables climáticas respecto a Altimetría. Lago Todos Los Santos.</i> .....	50
<i>Tabla 22: Resultados estadísticos de Precipitación in situ respecto a Altimetría. Lago Todos Los Santos.</i> .....	51
<i>Tabla 23: Resultados Test-t para variables climáticas. Lago Todos Los Santos. 2002-2018.</i> .....	51
<i>Tabla 24: Resultados estadísticos. Lago Llanquihue, periodo 2002-2010.</i> .....	52
<i>Tabla 25: Resultados Test-t para variables climáticas. Lago Llanquihue 2002-2010.</i> ...	53
<i>Tabla 26: Resultados estadísticos. Lago Llanquihue, periodo 2013-2016.</i> .....	53
<i>Tabla 27: Resultados Test-t para variables climáticas. Lago Llanquihue. 2013-2018.</i> ..	54
<i>Tabla 28: Resultados estadísticos. Lago Ranco, periodo 2002-2010.</i> .....	55
<i>Tabla 29: Resultados Test-t para variables climáticas. Ranco. 2002-2010.</i> .....	56
<i>Tabla 30: Resultados estadísticos. Lago Ranco, periodo 2013-2018.</i> .....	56
<i>Tabla 31: Resultados estadísticos de Precipitación in situ respecto a Altimetría. Lago Ranco. 2013-2018.</i> .....	57
<i>Tabla 32: Resultados Test-t para variables climáticas. Ranco. 2013-2018.</i> .....	57

## Lista de Figuras

<i>Figura 1: Limnómetro. Fuente: Departamento de Geología, Universidad de Sonora. ....</i>	5
<i>Figura 2: Regiones ENSO. Fuente: NOAA climate.gov, 2018. ....</i>	8
<i>Figura 3: Imagen artística TRMM. Fuente: NASA pmm.nasa.gov/TRMM, 2019. ....</i>	10
<i>Figura 4: Lago Ranco. Fuente: Elaboración Propia. ....</i>	15
<i>Figura 5: Lago Llanquihue. Fuente: Elaboración Propia. ....</i>	16
<i>Figura 6: Lago Todos Los Santos. Fuente: Elaboración Propia. ....</i>	17
<i>Figura 7: Misiones satelitales utilizadas en Lago Ranco. Fuente: DAHITI. ....</i>	20
<i>Figura 8: Misiones satelitales utilizadas en Lago Llanquihue. Fuente: DAHITI. ....</i>	20
<i>Figura 9: Misiones satelitales utilizadas en Lago Todos Los Santos. Fuente: DAHITI. .</i>	20
<i>Figura 10: Estaciones Pluviométricas utilizadas. Fuente: Elaboración Propia. ....</i>	23
<i>Figura 11: Estaciones de Temperatura utilizadas. Fuente: Elaboración Propia .....</i>	25
<i>Figura 12: Esquema de Metodología. ....</i>	28
<i>Figura 13: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Ranco 2002-2010.....</i>	33
<i>Figura 14: Nivel de Agua VS ONI. Lago Ranco. 2002-2010. ....</i>	34
<i>Figura 15: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Ranco 2013-2018.....</i>	36
<i>Figura 16: Nivel de Agua VS ONI. Lago Ranco. 2013-2018.. ....</i>	37
<i>Figura 17: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Llanquihue 2002-2010.....</i>	38
<i>Figura 18: Nivel de Agua VS ONI. Lago Llanquihue. 2002-2010. ....</i>	39
<i>Figura 19: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Llanquihue 2013-2016.....</i>	41
<i>Figura 20: Nivel de Agua VS ONI. Lago Llanquihue. 2013-2016. ....</i>	42
<i>Figura 21: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Todos Los Santos 2002-2018.....</i>	43

<i>Figura 22: Nivel de Agua VS ONI. Lago Todos Los Santos.2002-2018. ....</i>	44
<i>Figura 23: Diagrama de Taylor .Lago Todos Los Santos. A: Altimetría. C: Temperatura. D: ONI. ....</i>	50
<i>Figura 24: Diagrama de Taylor. Lago Todos Los Santos. A: Altimetría. B: Precipitaciones In Situ. ....</i>	51
<i>Figura 25: Diagrama de Taylor Lago Llanquihue 2002-2010. A: Altimetría, B: ONI ,E: Temperatura. ....</i>	52
<i>Figura 26: Diagrama de Taylor. Lago Llanquihue 2013-2016. A: Altimetría, B: ONI, E: Temperatura. ....</i>	53
<i>Figura 27: Acercamiento Fig.33, C: TRMM, D: Precipitaciones. ....</i>	55
<i>Figura 28: Diagrama de Taylor Lago Ranco 2002-2010. A: Altimetría, B: ONI. ....</i>	55
<i>Figura 29: Diagrama de Taylor Lago Ranco 2013-2018. A: Altimetría, B: ONI, D: Temperatura. ....</i>	56
<i>Figura 30: Diagrama de Taylor Lago Ranco 2013-2018. A: Altimetría, B: Precipitaciones. ....</i>	57



## Lista de Ecuaciones

<i>Ecuación 1: Componentes de una serie temporal.</i> .....	12
<i>Ecuación 2: Transformada Discreta de Fourier.</i> .....	13
<i>Ecuación 3: Frecuencia de Nyquist.</i> .....	14
<i>Ecuación 4: Ecuación filtro de Chebyshev.</i> .....	29
<i>Ecuación 5: Identidad de Euler.</i> .....	31
<i>Ecuación 6: Numero complejo obtenido desde TDF.</i> .....	31
<i>Ecuación 7: Amplitud.</i> .....	31
<i>Ecuación 8: Coeficiente de Correlación de Pearson</i> .....	32



## Lista de Símbolos, Nomenclatura o Abreviaciones

**ANOVA:** *Analysis of Variance.*

**CPC:** *Climate Prediction Center.*

**CERES:** *Clouds and the Earth's Radiant Energy Scanner.*

**DAHITI:** *Database for Hydrological Time Series of Inland Waters.*

**DGA:** *Dirección General de Aguas.*

**DMC:** *Dirección Meteorológica de Chile.*

**TDF:** *Transformada Discreta de Fourier.*

**ENSO:** *El Niño- Southern Oscillation.*

**ESRL:** *Earth System Research Laboratory.*

**INIA:** *Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.*

**JAXA:** *Japan Aerospace Exploration Agency.*

**LIS:** *Lightning Imaging Sensor.*

**MEI:** *Multivariate ENSO Index.*

**MOP:** *Ministerio de Obras Públicas.*

**NASA:** *National Aeronautics and Space Agency.*

**NOAA:** *National Oceanic and Atmospheric Administration.*

**ONI:** *Oceanic Niño Index.*

**PR:** *Precipitation Radar.*

**RMSE:** *Root Mean Square Error.*

**SD:** *Standard Deviation.*

**SOI:** *Southern Oscillation Index.*

**SVR:** *Support Vectorial Regression.*



**TMI:** *TRMM Microwave Imager.*

**TNI:** *Trans Niño Index.*

**TRMM:** *Tropical Rainfall Measuring Mission.*

**TSM:** *Temperatura de la Superficie del Mar.*

**VIRS:** *Visible and Infra Red Scanner.*



## 1. Introducción

El monitoreo de cuerpos de agua es la observación continua y permanente a través de alguna instrumentación, cuya finalidad es detectar variaciones en distintos tipos de parámetros para diversas áreas de estudio, como lo son: estudios pluviométricos, meteorológicos, calidad de agua, volumétricos, niveles de embalses y lagos (Dirección General de Aguas, 2017).

En Chile existen grandes reservas de agua dulce, como lo son glaciares, lagos y ríos. Según Ministerio de Obras Públicas (2013), se ha contabilizado más de 15000 lagos y lagunas que son de vital importancia para la subsistencia de la población y las diversas actividades económicas de esta. Estos lagos son monitoreados por la Dirección General de Aguas (DGA) perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP). Frecuentemente monitorea el nivel de aguas de lagos a través de estaciones de monitoreo *in-situ* (MOP, 2013). Sin embargo, muchos lagos no poseen este instrumental o se encuentran fuera de servicio, por lo que no poseen registros (Comunicación personal, DGA). No obstante, existen fuentes de datos satelitales, libremente disponibles, que pueden complementar los estudios basados en datos *in-situ* (e.g Altimetría Satelital, TRMM, entre otras.). Sin embargo, en Chile no se complementa el monitoreo de datos *in-situ* con datos satelitales, y además no se conocen estudios específicos de los lagos Todos Los Santos, Llanquihue y Ranco. Contar con esta información constituye un pilar fundamental en la toma de decisiones respecto a este recurso hídrico (Dirección General de Aguas, 2006).

Los lagos Todos Los Santos y Llanquihue están ubicados en la X Región de Los Lagos, siendo este último el segundo lago más grande de Chile, (Cortes, I., Olmedo, M., 2011).

El lago Ranco está ubicado en la XIV Región de Los Ríos, siendo el tercer lago más grande de Chile y es poblado en gran parte de su costa por diversas comunidades (Huechan, A., 1997).

En el contexto de esta investigación, se analizarán las variaciones de nivel de agua de estos lagos con otras plataformas satelitales, y la identificación de las relaciones hidrológicas de cuerpos de agua y conductores climáticos (e.g. ENSO). El entendimiento de esta relación ayudaría a la gestión eficiente de este recurso hídrico frente a sequías e inundaciones (Abtew et al., 2010).





### **1.1. Objetivo General.**

Analizar la variación de nivel de aguas de los lagos Todos los Santos, Llanquihue, y Ranco, con base a observaciones satelitales, en el periodo 2002-2018.

### **1.2. Objetivos Específicos.**

- Confeccionar las series temporales de nivel de agua.
- Analizar variaciones lineales, y componentes cíclicas en las series temporales.
- Correlacionar los datos de nivel de agua con datos de precipitación, temperatura y conductores climáticos (ENSO).



## **2. Revisión Bibliográfica.**

### **2.1. Generalidades.**

#### **2.1.1. Importancia del monitoreo de nivel de aguas de lagos.**

Según Dirección General de Aguas (2006), contar con información respecto a las variaciones del nivel de agua y otros parámetros de estudio en lagos, lagunas, embalses y ríos constituye un pilar fundamental en la toma de decisiones respecto a este recurso hídrico y sus impactos en diversos ámbitos de interés para la sociedad y el país. Según Abteu et al. (2010), el estudio del nivel de agua de lagos y su relación con conductores climáticos permitiría la gestión eficiente del recurso hídrico frente a sequías e inundaciones, las que pueden afectar directa y/o indirectamente a la población.

#### **2.1.2. Institución encargadas del monitoreo lacustre en Chile.**

La Dirección General de Aguas (DGA) es el organismo dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP) encargada de estudiar los cuerpos de agua (e.g. ríos, lagunas, lagos, embalses) en diferentes áreas de estudio como lo son: estudios pluviométricos, meteorológicos, calidad de agua, volumétricos, niveles de embalses y lagos (Dirección General de Aguas, 2017).

## 2.2. Técnicas de medición de nivel de aguas.

### 2.2.1. *In-situ.*

La Dirección General de Aguas (DGA) basa el monitoreo de nivel de agua de lagos mediante estaciones de monitoreo *in-situ*, las cuales constan de una escala graduada denominada “limnómetro” (Ver Fig.1.), cuyo objetivo es la medición y registro digital o análogo del nivel de agua de forma continua, y de esta manera poder establecer patrones de comportamiento histórico de las condiciones hidrológicas (Dirección General de Aguas, 2006). Sin embargo, muchos lagos no poseen este instrumental o se encuentran fuera de servicios, por lo que no poseen registros como lo es en el caso de los lagos Ranco, Llanquihue y Todos Los Santos. (Comunicación personal, DGA).



Figura 1: Limnómetro. Fuente: Departamento de Geología, Universidad de Sonora.

### 2.2.2. Altimetría satelital.

El principio fundamental de la altimetría satelital es medir la distancia desde el satélite a la superficie del agua. Los radares altimétricos a bordo transmiten señales a más de 1700 pulsos de microondas por segundo con potencia conocida hacia la Tierra, y reciben los ecos desde la superficie (Chelton et al., 2001). Los radares altimétricos muestrean la superficie de la Tierra día y noche en todas condiciones climáticas, y abordan una amplia variedad de cuestiones hidrológicas desde el monitoreo del océano, el cambio climático, hasta el monitoreo de las variaciones del nivel del agua (Stefano Vignudelli & Benveniste, 2011). Según Ilk et al. (2005) la altimetría satelital es capaz de monitorear la variabilidad del nivel del agua de una manera rápida, global y precisa. Inicialmente los satélites altimétricos fueron desarrollados para monitorear océanos, sin embargo, cuarenta años de misiones altimétricas proveyeron estudios hidrológicos en aguas continentales (Calmant & Seyler, 2006).

- **Historia de la Altimetría Satelital.**

Inicialmente fue diseñada para determinar la topografía de la superficie oceánica, mediante la utilización de técnicas de radar, que consiste en medir la distancia desde el satélite a una superficie reflectante, y una técnica de posicionamiento, la cual otorga una ubicación de alta precisión del satélite en su órbita. Entre las primeras misiones satelitales se encontraban Skylab, GEOS 3, Seasat y Geosat. En 1991 se realiza el lanzamiento de ERS-1, que se implementaba en 3 orbitas diferentes con diversos instrumentos a bordo, incluyendo el primer radar altimétrico. La misión TOPEX /Poseidon lanzada en 1992 proveyó más detalles que las observaciones *in-situ* en los últimos cien años. Su continuidad, homogeneidad y calidad de datos durante más de trece

años han ayudado a la colaboración científica en diversas áreas de estudio donde la altimetría satelital puede ser utilizada. Posteriormente se lanzan nuevas misiones satelitales altimétricas, como lo es ERS-2 (1995), GFO (1998), Jason 1(2001) y ENVISAT (2002). La utilización combinada de varios satélites ha permitido con el transcurso del tiempo obtener una altimetría satelital de alta precisión (AVISO, 2014).

### **2.3. El Niño Southern Oscillation (ENSO).**

Es un fenómeno climático océano - atmosférico producido en el océano Pacífico tropical que consiste en un calentamiento anómalo de la superficie del mar asociado a una fluctuación en la presión atmosférica. Este fenómeno climático puede cambiar de un lugar a otro de forma irregular cada dos o siete años aproximadamente, y cada fase provoca variaciones predecibles de la temperatura superficial del mar, presión atmosférica, temperatura del aire, precipitación, dirección e intensidad de vientos.

Dichas variaciones producen la interrupción de los movimientos de aire a gran escala en los trópicos, provocando así una variación climática en el trópico con efectos secundarios en otras regiones del planeta como Asia, Oceanía, Europa y América (NOAA/CPC, 2015). El Niño se produce en conjunto con la Oscilación Sur, que corresponde a una fluctuación de gran escala de la presión atmosférica, entre el océano Pacífico tropical suroriental y el océano Pacífico occidental (Universidad Católica de Chile, 2005).

Este ciclo global tiene dos fases: la fase conocida como “El Niño”, donde la temperatura superficial del océano entra en una fase cálida y la atmósfera entra a una fase “negativa”; y la fase conocida como “La Niña” donde la temperatura superficial del océano entra en

una fase fría, y la atmosfera entre a una fase “positiva”. En general, “El Niño” provoca periodos secos fuertes y prolongados, mientras que “La Niña” amplifica las lluvias y caudales máximos. Cada evento ENSO en cualquiera de sus fases varía considerablemente uno del otro, en aspectos de duración e intensidad (Poveda & Mesa., 1996).

Para lograr un mejor estudio del desarrollo de este fenómeno climático y sus respectivas fases, se definieron cuatro regiones de acción o estudio. Las regiones son: Niño 4, Niño 3, Niño3.4 y Niño 1+2 (NOAA, 2018).



Figura 2: Regiones ENSO. Fuente: NOAA climate.gov, 2018.

#### **2.4. Relación de la variabilidad de nivel de agua de lagos con conductores climáticos.**

Según Szestzay (1974), las fluctuaciones en el nivel de agua de lagos se consideran un indicador significativo de algún cambio climático. Las concordancias de un cambio de temperatura en el océano Pacífico con un cambio en la variación del nivel de aguas de lagos es una confirmación del vínculo existente entre clima e hidrología (Belete et al., 2017). Pasquini et al. (2008) determinaron a través de un análisis de *Fourier* que la variabilidad del nivel de agua de lagos pro-glaciales en la Patagonia Argentina estaban correlacionados con el fenómeno climático El Niño. Las investigaciones realizadas por Awange et al. (2008) determinaron la contribución climática en la variación del nivel de agua del lago Victoria, a través del análisis de series temporales, sus variaciones lineales, cíclicas, y su relación con conductores climáticos (e.g. ENSO). En el estudio realizado por Hwang et al. (2005) lograron realizar un análisis de la variación del nivel de agua de diferentes lagos en China, a partir de datos del satélite Topex/Poseidon, los cuales fueron correlacionados con datos de precipitación in-situ e índices ENSO, donde se logró demostrar una relación entre el fenómeno climático El Niño y la variación de nivel de agua de los lagos estudiados.

## 2.5. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).

Es una misión satelital conjunta entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) cuyo objetivo son el monitoreo y estudio de precipitaciones tropicales y subtropicales para la investigación de meteorología y el clima. Fue lanzado en Noviembre de 1997, y lleva a bordo cinco instrumentos de monitoreo: *Precipitation Radar* (PR), *TRMM Microwave Imager* (TMI), *Visible and Infrared Scanner* (VIRS), *Clouds and the Earth's Radiant Energy Scanner* (CERES), *Lightning Imaging Sensor* (LIS) (National Aeronautics and Space Administration, 1997).



Figura 3: Imagen artística TRMM. Fuente: [NASA pmm.nasa.gov/TRMM](http://NASA.pmm.nasa.gov/TRMM), 2019.

### 2.5.1. Investigación relacionada con el clima.

La utilización de la misión satelital TRMM para el estudio de la distribución de la lluvia en los trópicos ha logrado obtener datos climatológicos de referencia de trece años para futuros estudios de climatología de lluvia, permitiendo de esta forma una reducción de incertidumbre en los pronósticos climatológicos de lluvia (Adler et al., 2009). Según L'Ecuyer et al. (2006) los productos TRMM han permitido determinar las variaciones interanuales relacionadas con ENSO; como lo son las investigaciones de Nakazawa & Rejendran (2009), que demostraron que los datos obtenidos desde TRMM pueden



detectar la variación interanual de la lluvia relacionada con los cambios de temperatura en la superficie del mar vinculados a ENSO. Según Braun (2011), los registros TRMM más extensos permiten caracterizar de mejor manera la variabilidad climática interanual en general, y el fenómeno ENSO en particular, debido a que otorgan anomalías cuantitativas de lluvias tropicales que son necesarias para la comprensión de efectos locales y globales producidas por este fenómeno, y de esta forma poder mejorar las predicción de sus efectos socioeconómicos en la población.



## 2.6. Series Temporales.

Una serie de tiempo es un conjunto de datos observados y/o registrados de forma secuencial de una variable que está en función del tiempo (Chattopadhyay et al., 2014).

Estas permiten explorar, analizar y pronosticar cambios a través del tiempo en diversas áreas de estudio (e.g. economía, meteorología, climatología, geología, biología, etc.).

Según Alonso (2009), las series temporales son las sumas de varias componentes:

$$X_t = T_t + S_t + I_t \quad (1)$$

Donde,  $X_t$  es el valor observado;  $T_t$  es la tendencia, que corresponde al comportamiento de la serie de tiempo a largo plazo;  $S_t$  es la estacionalidad, que corresponde a las oscilaciones dentro de un año, y  $I_t$  que son variaciones aleatorias alrededor de los componentes anteriores.

### 2.6.1. Análisis de tendencias.

Alonso (2009), define la tendencia como el comportamiento o movimiento suave de la serie en un largo periodo de tiempo. Las series de tiempo expresan una tendencia gradual en sus datos y componentes periódicos, aquellas series de tiempo en las que sus propiedades cambian progresivamente con el tiempo se denominan “no estacionarias”. Se pueden observar varios tipos de estacionalidad con la ausencia de tendencias en el valor promedio, u otras propiedades estadísticas de la señal. La tendencia se puede detectar y eliminar de los datos utilizando una regresión lineal (Middleton, 2000).

### 2.6.2. Análisis Espectral.

El periodograma es una herramienta para estimar la densidad espectral de una señal, es decir, examinar las características de la amplitud frente a frecuencia. Para confeccionarlo se debe realizar el traspaso de una señal desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (Schuster, 1906). Existen algoritmos matemáticos (e.g. TDF) que permiten realizar este traspaso de dominio en diversos tipos de señales para diferentes áreas de estudio (e.g. sonología, reconocimiento del habla, imageneología, salud.) (Bobadilla et al., 1999). De esta manera se puede obtener los parámetros básicos para graficar de manera explícita las periodicidades existentes, su importancia, y así lograr realizar un análisis espectral (Nadeau et al., 1981).

- **Transformada Discreta de Fourier (TDF).**

El análisis de Fourier es una de las técnicas matemáticas que permite la descomposición de una señal en sinusoides, escogidas correctamente (Smith, 1999).

La ecuación para calcular la TDF, está dada por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \left[ \cos\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right) + i \cdot \text{sen}\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right) \right] \quad (2)$$

Donde,  $x(n)$  es la señal en dominio del tiempo a ser analizada,  $X(k)$  son las señales en dominio de la frecuencia que se calcularán,  $N$  es el número de observaciones a analizar.

El índice  $n$  inicia desde 0 hasta la muestra  $N - 1$ , mientras que  $k$  inicia desde la frecuencia 0 hasta  $N/2$ . El valor del parámetro  $n$  determina la frecuencia que se va a analizar, representa cada una de las frecuencias en la que se va a descomponer la señal.

Para hacer el análisis de todas las frecuencias se debe utilizar el rango completo de  $n$ :  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$  (Smith, 1999).

Según el criterio de *Nyquist*, el ancho de banda de una señal coincide con la mitad de la frecuencia de muestreo, a esta frecuencia se le denomina Frecuencia de Nyquist ( $f_N$ ).

$$f_N = \frac{1}{2\Delta} \quad (3)$$

Los valores obtenidos para  $0 < n < N/2$  coinciden con los valores obtenidos entre  $N/2 < n < N - 1$ , por lo que es suficiente calcular la TDF en una de las dos mitades (Bobadilla et al., 1999).



### 3. Área de Estudio.

#### 3.1. Lago Ranco.

El lago Ranco es el tercero más grande de Chile con una superficie de 429,9 km<sup>2</sup> (DGA, 2016). Se encuentra ubicado en la XIV Región de Los Ríos, la cual posee un clima templado lluvioso, con pocos periodos secos. Sin embargo, el clima de la región posee variaciones por la geografía dentro de la misma (Biblioteca del Congreso Nacional, 2016). Es poblado en gran parte de su costa por diversas comunidades que dependen económicamente del recurso hídrico (Huechan, 1997). (Ver Fig.4).

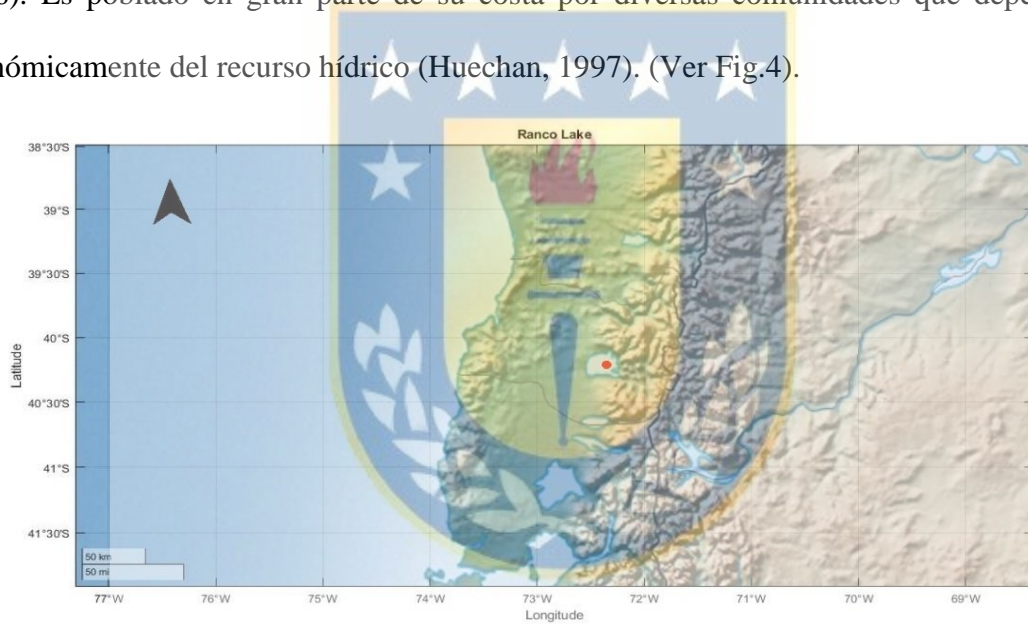


Figura 4: Lago Ranco. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2. Lago Llanquihue.

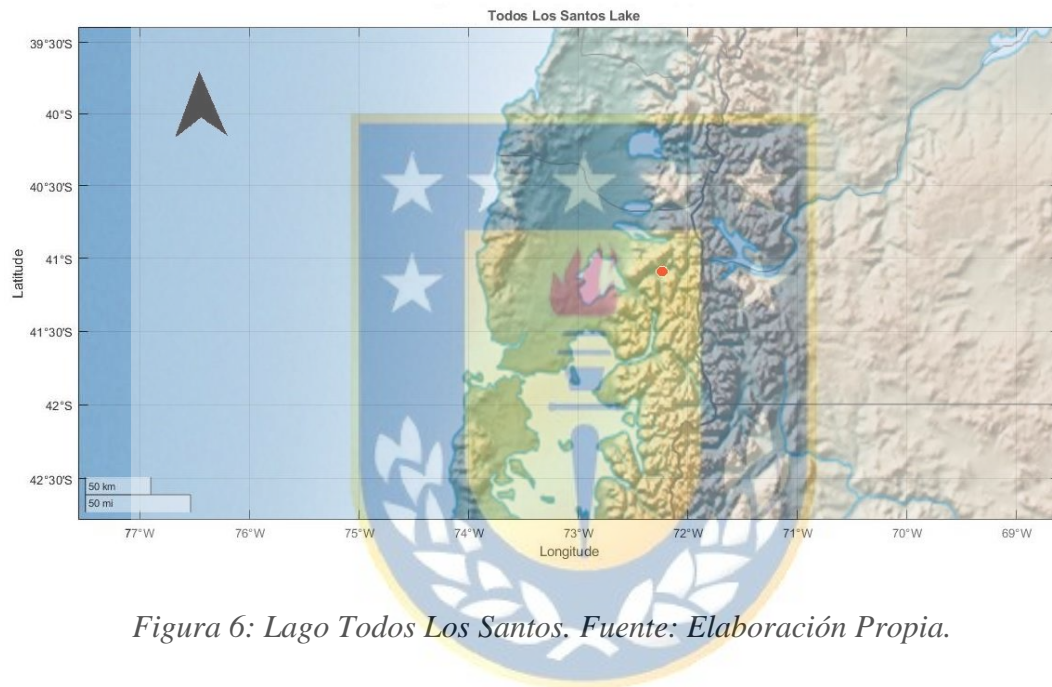
El lago Llanquihue es el segundo más grande de Chile, con una superficie de 867,1 km<sup>2</sup> (DGA, 2016). Se encuentra ubicado en la X Región de Los Lagos, la cual posee un clima templado oceánico o lluvioso, sin periodos secos durante el periodo anual (Biblioteca del Congreso Nacional, 2016). Posee una gran población en su borde costero y su máxima extensión es de Este a Oeste con 43 kilómetros.; mientras que su extensión de Norte a Sur es de 41 kilómetros (Solano, 1899). (Ver Fig.5).



*Figura 5: Lago Llanquihue. Fuente: Elaboración Propia.*

### 3.3. Lago Todos Los Santos.

El lago Todos los Santos se encuentra ubicado en la X Región de Los Lagos. tiene una superficie de 177 km<sup>2</sup> (DGA, 2016). Se encuentra al costado Este del volcán Osorno, y es sustentador de diversas actividades económicas (e.g. Agricultura, acuicultura, turismo) (Cortes, I., Olmedo, M., 2011). (Ver Fig.6).



*Figura 6: Lago Todos Los Santos. Fuente: Elaboración Propia.*

## 4. Datos.

### 4.1. Niveles de agua basados en datos de altimetría satelital.

La plataforma *Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI)* proporciona datos gratuitos para series temporales de nivel de agua de lagos, embalses, ríos y humedales, posee una resolución espacial global exceptuando la Antártica. Para la estimación de nivel de agua de cuerpos de agua se utilizan datos de diversas misiones de altimetría satelital, como lo son: TOPEX, JASON 1, JASON 2, JASON 3, GFO, ENVISAT, ERS 1, ERS 2, Cryosat, IceSAT, SARAL/Altika, Sentinel 3A, Sentinel3B. El procesamiento de los datos satelitales brutos está basado en la detección de *outliers* y un filtro de Kalman, el cual está realizado por *DAHITI* previamente a la obtención de los datos altimétricos desde su plataforma (DAHITI, 2016).

La detección de valores atípicos se basa en los siguientes criterios:

- *Latitude Thresholds.*
- *Water Height thresholds*
- *Height error treshold*
- *Backscatter coefficient treshold.*
- *Along- track outlier test.*

Los últimos dos criterios respectivamente, proveen información sobre la reflectancia de la superficie, la cual puede ser usada para eliminar mediciones afectadas por hielo (Schwatke et al., 2015). El último criterio es un soporte de regresión vectorial (*SVR*) el cual consiste en la aplicación de una regresión lineal a cada *track* para eliminar las



mediciones altimétricas que no representan el nivel de agua, esto debido a la influencia de contaminación del suelo (Smola & Scholkopf, 2004).

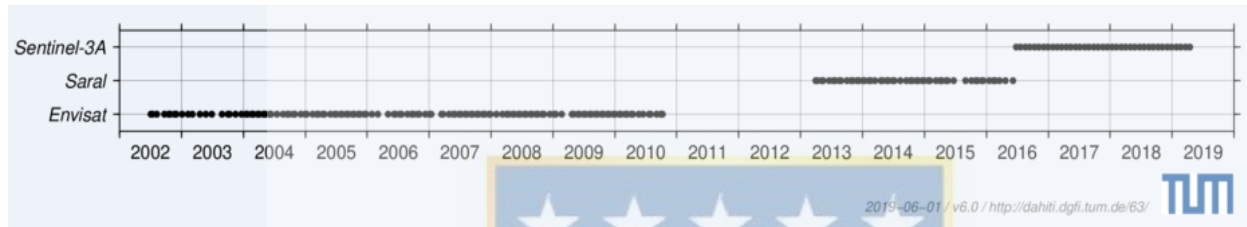
Los parámetros de detección de *outliers* son muy flexibles, debido a que depende fuertemente del cuerpo de agua estudiado.

Posterior a esto se aplica un filtro de Kalman, el cual realiza la estimación de series temporales de nivel de agua a partir de las alturas de entrada de los *track* combinando datos dependientes del tiempo a intervalos irregulares y en diferentes ubicaciones geográficas. Diferentes enfoques de filtro de Kalman han sido utilizado para aplicaciones geodésicas (e.g., Yang et al., 2006; Eicker et al., 2014 y Gruber et al., 2014). Este algoritmo realiza un ajuste secuencial de mínimos cuadrados tomando en cuenta las precisiones de los datos de entrada, así como el comportamiento determinístico y estocástico, y así producir una estimación estadísticamente óptima de la serie temporal del nivel del agua (Schwatke et al., 2015).

Debido a que los datos obtenidos desde la plataforma DAHITI provienen de diversas misiones satelitales altimétricas, en algunos meses existen más de un dato altimétrico, a los cuales fue calculada su media aritmética para así obtener un solo dato mensual. Sin embargo, existen meses en los cuales no existen datos altimétricos por lo que fue necesario realizar una interpolación temporal para obtener dichos datos faltantes. Esta interpolación fue realizada con el *software Matlab* mediante la función *interp1*, la cual devuelve un vector que contiene valores correspondientes a observaciones en un intervalo de tiempo específico, el cual es determinado por la interpolación lineal entre el periodo de observación y los datos originales.

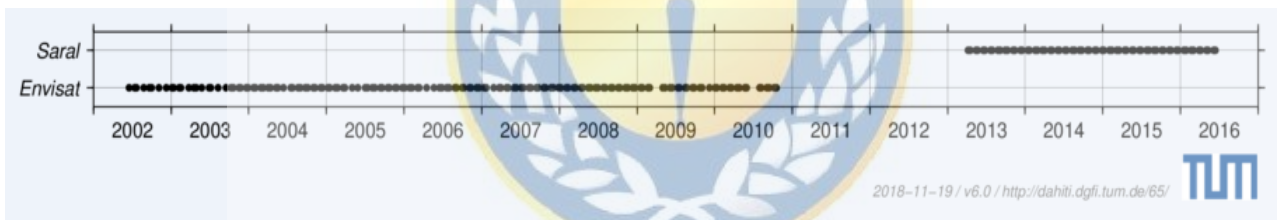
Para cada lago en estudio se recuperó la totalidad de datos altimétricos disponibles, que corresponden a datos numéricos correspondientes al nivel de agua. Esto se realizó desde la plataforma de *DAHITI* (<https://dahiti.dgfi.tum.de/en/>), los cuales corresponden a las siguientes misiones satelitales:

- Lago Ranco (2002-2010), (2013-2018):



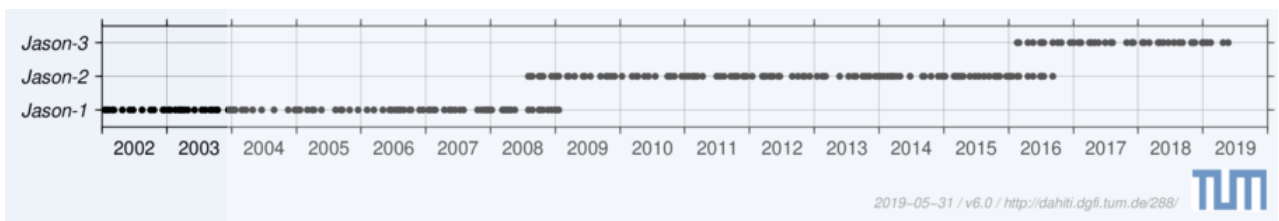
*Figura 7: Misiones satelitales utilizadas en Lago Ranco. Fuente: DAHITI.*

- Lago Llanquihue (2002-2010), (2013-2016):



*Figura 8: Misiones satelitales utilizadas en Lago Llanquihue. Fuente: DAHITI.*

- Lago Todos Los Santos (2002 – 2018):



*Figura 9: Misiones satelitales utilizadas en Lago Todos Los Santos. Fuente: DAHITI.*

#### 4.2. Precipitación desde datos satelitales.

Los datos de precipitación en base a datos satelitales se obtuvieron desde la misión *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*, la cual ofrece productos grillados gratuitos con el objetivo principal de mejorar el conocimiento de la variabilidad temporal de la precipitación global (Hou et al.,2011). Ochoa et al. (2014) aplicó datos de precipitación desde TRMM para la simulación y predicción hidrológica. Los datos se pudieron obtener mediante el visualizador de datos “GIOVANNI” de *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service>) de acuerdo a los siguientes parámetros:

- *Time Series: Hovmoller, Longitude- Averaged*
- *Variable: PrecipitationRate (TRMM\_3B43v7)*
- *Units: mm/month*
- *Source: TRMM*
- *Temporal Resolution: Monthly*
- *Spatial Resolution: 0.25°*



Lago	Todos Los Santos	Llanquihue	Ranco
Periodo	01/01/2002 - 31/03/2019	01/01/2002- 31/03/2019	01/01/2002 - 31/03/2019
Región	1) 72.4223 W , 41.2317 S	1) 72.9809 W , 41.2846 S	1) 72.6534 W ,40.3626 S
	2) 72.0213 W ,41.0221 S	2) 72.6714 W ,41.0296 S	2) 72.2139 W, 40.1250 S


*Tabla 1: Características de productos TRMM obtenidos para lagos en estudio.*

### 4.3. Estaciones pluviométricas.

En Chile la Dirección General de Aguas (DGA) posee estaciones de monitoreo continuo de precipitaciones. Estas estaciones poseen registros de la media mensual de todas las observaciones realizadas (*Center for Climate and Resilience Research, 2013*). Los datos de dichas estaciones fueron recuperados desde el explorador climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (<http://explorador.cr2.cl/>).

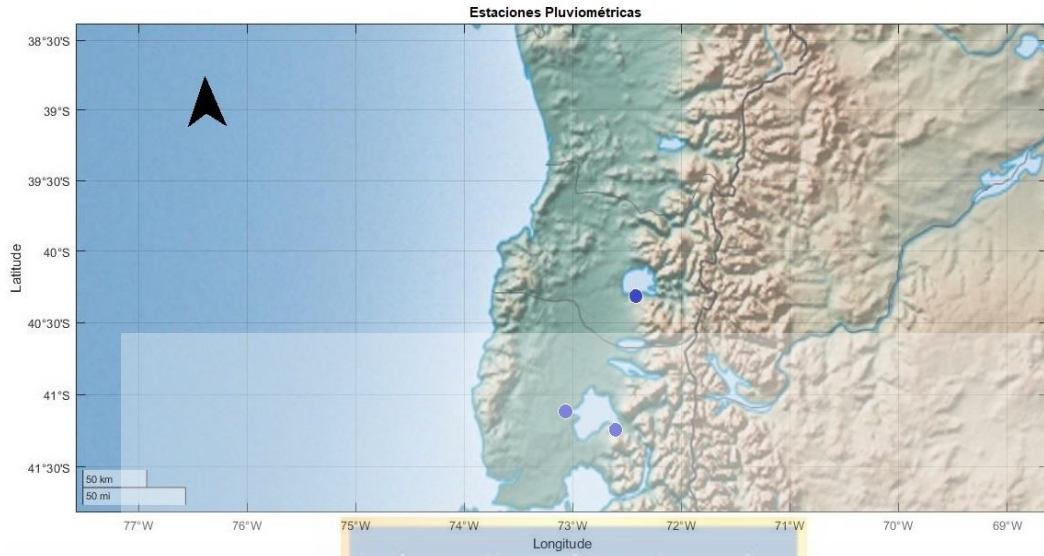
Los datos corresponden a las precipitaciones mensuales (mm/mes) de las siguientes estaciones de observación entre el periodo 2002-2018 (Ver Tabla 2 y Fig.10):

- Lago Ranco.
- La Ensenada.
- Frutillar.



Nº	Estación	Institución	Región	Latitud	Longitud	Altitud
1	Lago Ranco	DGA	Los Rios	40°19'04''S	72°28'09''O	100 m.s.n.m.
2	La Ensenada	DGA	Los Lagos	41°13'37''S	72°34'05''O	62 m.s.n.m.
3	Frutillar	DGA	Los Lagos	41°07'51''S	72°03'49''O	142 m.s.n.m.

*Tabla 2: Estaciones pluviométricas utilizadas.*



*Figura 10: Estaciones Pluviométricas utilizadas. Fuente: Elaboración Propia.*




#### 4.4. Estaciones Meteorológicas.

En Chile, existen diversas redes de estaciones meteorológicas, como lo son la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), y la del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Dichas redes meteorológicas ofrecen productos de diversos parámetros meteorológicos libremente disponibles para descargar.

La obtención de datos de temperatura se recuperó desde el explorador climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (<http://explorador.cr2.cl/>) y desde la Red Agro-meteorológica del INIA (<http://agromet.inia.cl/estaciones.php>).

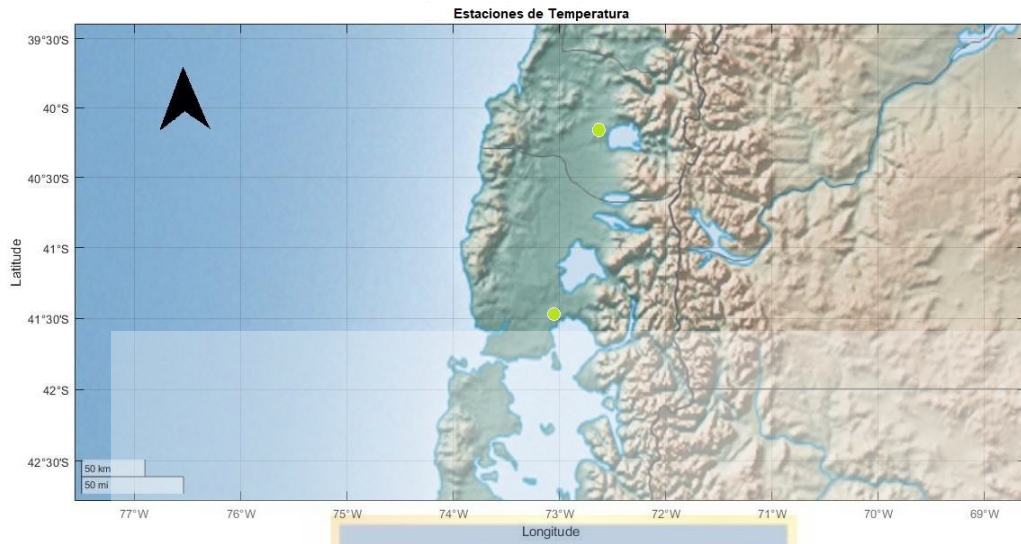
Estos datos corresponden a las temperaturas medias mensuales (°C/mes) de las siguientes estaciones de monitoreo, entre el periodo 2002-2018 (Ver Tabla 3 y Fig.11):

- El Tepual.
- Lago Verde.



N°	Estación	Institución	Región	Latitud	Longitud	Altitud
1	El Tepual	DMC	Los Lagos	40.165081°S	72.633843°O	248 m.s.n.m.
2	Lago Verde	INIA	Los Ríos	41.4350°S	73.0978°O	85 m.s.n.m.

*Tabla 3: Estaciones de temperatura utilizadas.*



*Figura 11: Estaciones de Temperatura utilizadas. Fuente: Elaboración Propia*



#### 4.5. Datos ENSO.

Según *Earth System Research Laboratory* (2009), existen varios índices para la definición, monitoreo y estudio de las variaciones de ENSO, como lo es el *Oceanic Niño Index* (ONI), *Southern Oscillation Index* (SOI), el *Multivariate ENSO Index* (MEI) y el *Trans Niño Index* (TNI).

Desde la plataforma de ESRL perteneciente a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/>) se obtuvieron índices que expresan el comportamiento de El Niño y La Niña. En la presente investigación se utilizó el *Oscillation Niño Index* (ONI), el que fue creado por *Climate Prediction Center* (CPC) perteneciente a la NOAA con la finalidad de definir las condiciones de El Niño y La Niña (NOAA/CPC, 2015).

Los fenómenos de El Niño y La Niña se caracterizan como periodos cálidos (rojo) y periodos fríos (azul) respectivamente basados en un umbral de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  para ONI, aplicando la media de 3 meses consecutivos de anomalías de la Temperatura de la Superficie del mar (TSM) en la región del Niño 3.4 (CPC, 2017) (Ver Tabla 4).



Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2002	-0.1	0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1	0.5	0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8

Tabla 4: Datos ONI. Años y meses de ocurrencia de El Niño en rojo, La Niña en azul, y neutro en negro. Fuente: CPC/NOAA, 2019.

Según Terassi et al. (2018), este índice puede ser clasificado como sigue:

Clasificación	Escala ONI
El Niño Fuerte	$\geq 1.7$
El Niño Moderado	0.9 a 1.69
El Niño Débil	0.5 a 0.89
Neutro	0.49 a -0.49
La Niña Débil	-0.49 a -1.49
La Niña Moderada	-1.49 a -1.69
La Niña Fuerte	$\leq -1.7$

Tabla 5: Clasificación ONI según Terassi et al.

## 5. Metodología.

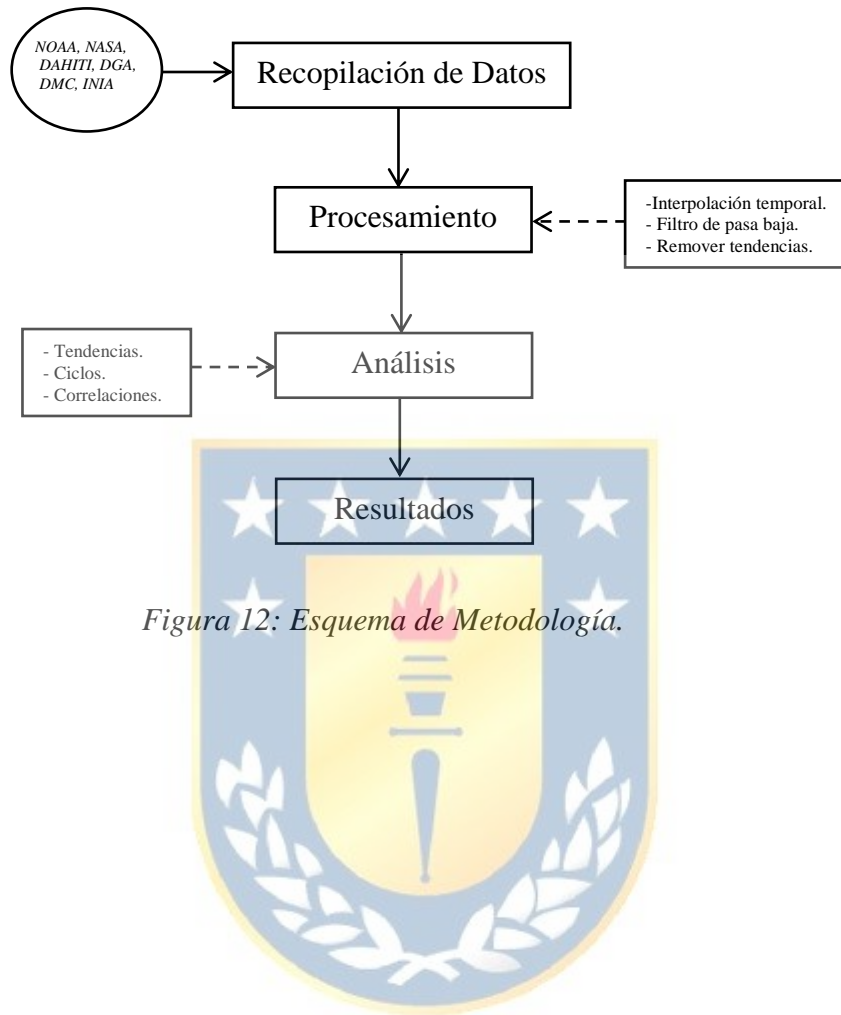


Figura 12: Esquema de Metodología.

## 5.1. Procesamiento de datos.

### 5.1.1. Datos de precipitación y temperatura.

En los registros de temperatura la hora del día tiene efecto sobre las lecturas diarias, como el interés de esta investigación son las fluctuaciones mensuales estas variaciones horarias solo contribuyen al ruido (Mathworks, 2018). En el caso de los datos de precipitaciones existen datos atípicos los cuales deben ser filtrados de igual forma que los datos de temperatura.

Para la utilización de los datos es necesario realizar un suavizado de las señales mediante la confección de un filtro de pasada baja, el cual tiene como finalidad atenuar las componentes de alta frecuencia y de esta forma suavizar la señal. Este filtro de pasa baja es de tipo I de *Chebyshev* y fue diseñado a través del software *Matlab*. Este filtro fija una frecuencia de corte la cual no permitirá pasar frecuencias mayores a esta y genera un rizado en la frecuencia pasante cuya amplitud está comprendida entre 1 y  $\frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2}}$ , donde  $\varepsilon$  es el factor de rizado, logrando de esta manera atenuar el ruido existente en las señales (Smith, 2003). El filtro de Chebyshev está dado por:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\left(1 + \varepsilon^2 \cdot C_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Donde  $n$  es el orden del filtro y  $\omega_1$  es la frecuencia de corte;  $C_n$  son los polinomios de Chebyshev de grado  $n$ .

## 5.2. Series Temporales.

Posterior al filtrado digital de los datos de precipitación y temperatura, se confeccionaron mediante el software *Matlab* series temporales de nivel de agua de los Lagos Todos Los Santos, Llanquihue y Ranco, mediante las cuales se pudo graficar el comportamiento de nivel de agua mensual. Para poder graficar dichas series temporales cada fecha de observación de los datos altimétricos debió ser transformada a años decimales, lo cual consiste en la suma del año con, la parte decimal del mes en el año, y la parte decimal del día en el mes; esto con la finalidad de poseer solo un dato numérico que corresponda a la fecha de registro.

Se analizaron las variaciones anuales del nivel de agua de cada lago mediante el cálculo de la diferencia entre la cota inicial y final de cada año, definiendo de esta forma los periodos de crecidas y estiajes, y así relacionarlos con el fenómeno ENSO.

La función *polyfit* de *Matlab* ajusta una curva con un polinomio de grado  $n$  (Mathworks, 2018); utilizando dicha función se ajustaron las series temporales para obtener la tendencia lineal del nivel de agua de cada lago, lo que permite observar el aumento o disminución del nivel de agua en un periodo de tiempo prolongado.

Posteriormente a las series temporales se les removió la tendencia mediante la función *detrend*, la cual elimina el valor de la media de los datos, y de esta forma se centra el análisis de los datos sobre la tendencia lineal (Mathworks, 2018).

### 5.3. Análisis Espectral.

Mediante la utilización del *software Matlab* se creó un *script* (Ver anexo 9.1) el cual permite analizar los patrones cíclicos de las señales de altimetría, precipitación, temperatura y el índice ONI para cada lago.

Este *script* utiliza la TDF (Ecuación 6) expresada a través de la identidad de Euler (Ecuación 5):

$$e^{\alpha i} = \cos \alpha + i \cdot \text{sen } \alpha \quad (5)$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right)i} \quad (6)$$

Mediante la TDF se obtienen números complejos, los que poseen una parte real y una parte imaginaria (Ecuación 7) de los cuales se puede extraer mediante el teorema de Pitágoras la amplitud de cada frecuencia a graficar en un periodograma (Ecuación 8).

$$X(k) = A_k + Bi_k \quad (7)$$

$$\text{Amplitud} = \sqrt{A_k^2 + Bi_k^2} \quad (8)$$

Cada periodograma permitirá establecer visualmente las frecuencias predominantes, y así compararlas entre los periodogramas de las diferentes variables climáticas en estudio. De esta forma se podrá observar y determinar si dichas variables poseen las mismas frecuencias predominantes para así poder establecer relación entre ellas.

#### 5.4. Correlación.

El método de correlación de Pearson es una técnica utilizada en diversas áreas de estudio, permite establecer el grado de relación existente entre dos variables aleatorias cuantitativas (Restrepo et al., 2007). Las investigaciones realizadas por Arango et al. (2012), pudieron determinar la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociado al fenómeno ENSO mediante el coeficiente de correlación de Pearson. La investigación realizada por Revillod (2018), utilizó este método para estudiar sequias, mediante el cálculo de correlaciones entre índices ENSO y mediciones GPS.

El coeficiente de correlación de Pearson se define por la fórmula:

$$\rho(x, y) = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x\sigma_y}, \text{ con } -1 \leq \rho \leq 1 \quad (9)$$

El coeficiente de correlación ( $\rho$ ) fluctúa entre -1 y 1; cuando  $\rho > 0$  existe una relación directa entre las variables; cuando  $\rho < 0$  la relación es inversa, y si  $\rho = 0$  los datos de las variables no presentan correlación entre sí (Restrepo et al., 2007). En esta investigación se aplicó este método entre los datos de nivel de agua y datos de precipitaciones y temperatura proveniente de estaciones in situ, datos precipitaciones provenientes de plataforma satelital (TRMM), y el índice ONI. Mediante la prueba estadística *t-student* se evaluó la hipótesis nula de las variables correlacionadas. Esta prueba fue realizada con un nivel de confianza de 95%. Los coeficientes obtenidos fueron graficados en un diagrama de Taylor, cuyo objetivo es facilitar la comparación y evaluación de diferentes modelos. Este diagrama es utilizado para cuantificar el grado de correspondencia a través de tres estadísticas: coeficiente de correlación de Pearson, *Root Mean Squared Error* (RMSE), y Desviación Estándar.

## 6. Resultados.

### 6.1. Series Temporales de Altimetría.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la confección de series temporales de nivel de agua y sus respectivas tendencias lineales de los lagos estudiados. También se presentan series temporales comparativas entre nivel de agua y el índice ONI, las que permiten relacionar visualmente la actividad del fenómeno ENSO con las crecidas y estiajes de los lagos estudiados.

Además se presentan tablas de análisis de varianza (ANOVA) con un 95% de nivel de confianza para las tendencias lineales y tablas que expresan la variación anual del nivel de agua de cada lago y periodo respectivamente, el cual fue calculado como fue especificado en el apartado 5.2.

#### 6.1.1. Lago Ranco 2002-2010.

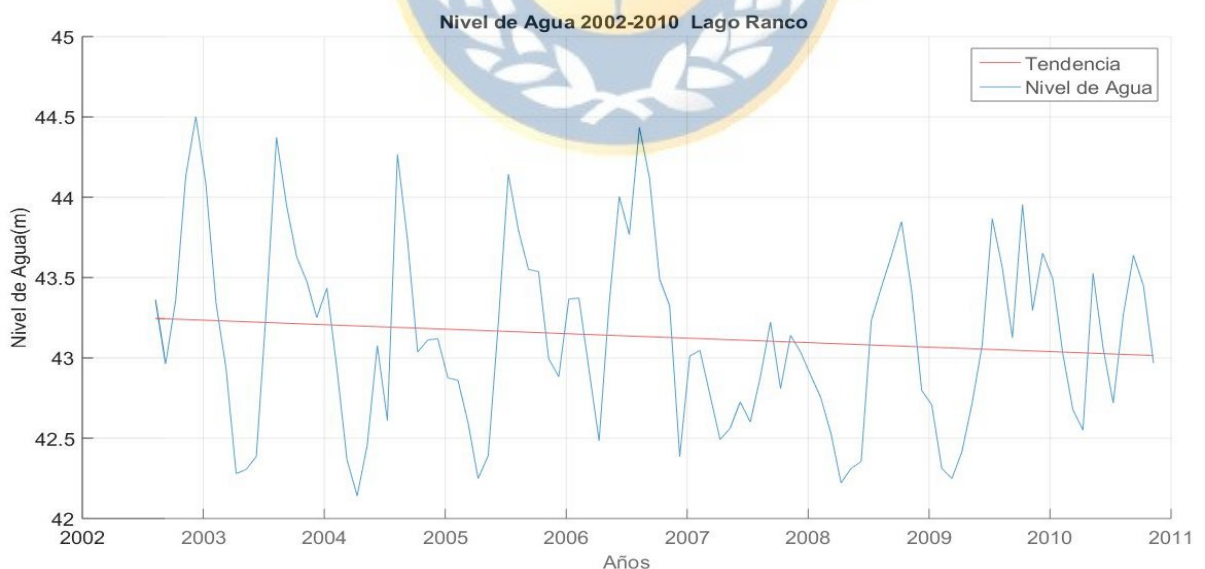


Figura 13: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Ranco 2002-2010.

Año	Variación Anual (mm)
2002 *	718
2003	93
2004	-52
2005	512
2006	84
2007	-157
2008	-44
2009	1181
2010 *	-60

\* Año con datos altimétricos faltantes.

Tabla 6: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Ranco. 2002-2010.

Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados
Regresión	1	0.45	0.453
Error	98	31.730	0.324
Total	99	32.182	

Tabla 7: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Ranco. 2002-2010.

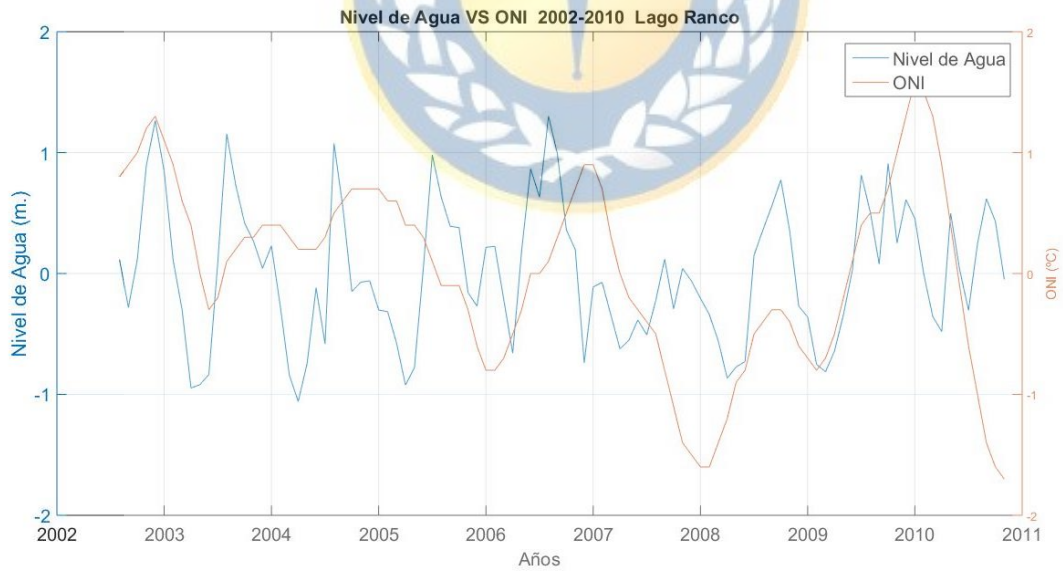


Figura 14: Nivel de Agua VS ONI. Lago Ranco. 2002-2010.



Analizando las variaciones anuales del nivel de agua del lago Ranco en el periodo 2002-2010 (Ver Tabla 6), se logró determinar los años de crecidas y estiajes, los cuales corresponden a:

- Crecidas: 2002, 2003, 2005, 2006, 2009.
- Estiajes: 2004, 2007, 2008, 2010.

El fenómeno El Niño estuvo presente a mediados del año 2002 hasta principio del año 2005, cuyas características climatológicas (periodos secos y fuertes) coinciden con las variaciones anuales de nivel de agua, que pese a ser positivas en su mayoría y de manera consecutiva su porcentaje de variación va disminuyendo. Entre finales del año 2005 y principios del año 2009 predominó el fenómeno La Niña, que coincide sus características climatológicas (aumento de lluvias) con el paso de una variación del nivel de agua negativa a una positiva. A finales del año 2009 y principio del año 2010 se presentó nuevamente el fenómeno El Niño, coincidente con el cambio de variación del nivel de agua, de positiva a negativa (Ver Tabla 4 y 6) (Ver Fig. 14).

La cota máxima fue alcanzada en el año 2003 con un nivel de agua de 44,5 m.; mientras que la cota mínima fue alcanzada en el año 2004 con 42,1 m. Posee una tendencia lineal negativa, cuya variación de nivel de agua disminuye en una razón de -28mm. /año (Ver Fig. 13).

### 6.1.2. Lago Ranco 2013-2018.



Figura 15: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Ranco 2013-2018.

Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados
Regresión	1	0.199	0.199
Error	67	24.094	0.360
Total	68	24.293	

Tabla 8: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Ranco. 2013-2018.

Año	Variación Anual (mm)
2013 *	56
2014	-64
2015	442
2016	115
2017	332
2018	474

\* Año con datos altimétricos faltantes.

Tabla 9: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Ranco. 2013-2018.



*Figura 16: Nivel de Agua VS ONI. Lago Ranco. 2013-2018.*

Analizando las variaciones anuales del nivel de agua del lago Ranco entre el periodo 2013-2018 (Ver Tabla 9), se logró determinar los años de crecidas y estiajes, los cuales corresponden a:

- Crecidas: 2013, 2015, 2016, 2017, 2018.
- Estiajes: 2014.

Entre los años 2015 y 2016 el lago tuvo variaciones anuales positivas en su nivel de agua que pese a ser positivas consecutivamente su porcentaje de variación disminuyó, lo que coincide con las características climáticas del fenómeno El Niño, cuya presencia fue fuerte en dicho periodo. En el periodo 2017-2018 el porcentaje de variación de nivel de agua aumentó, lo que coincide con la presencia del fenómeno La Niña entre finales del año 2017 y principio del año 2018 (Ver Tabla 4 y 9) (Ver Fig.16).

En este periodo el lago Ranco alcanzó su cota máxima el año 2015, con 44.7 m., mientras que su cota mínima llegó a los 42m. en el año 2016. Posee una tendencia lineal negativa, cuya variación de nivel de agua disminuye en una razón de -32 mm. /año (Ver Fig.15).

### 6.1.3. Lago Llanquihue 2002-2010.

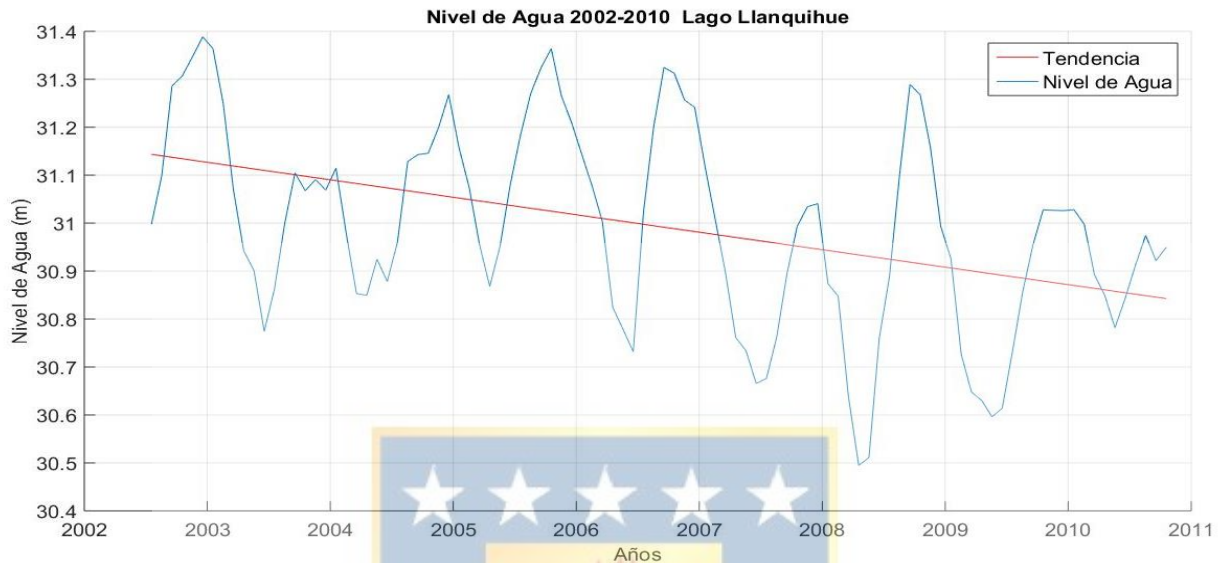


Figura 17: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Llanquihue 2002-2010.

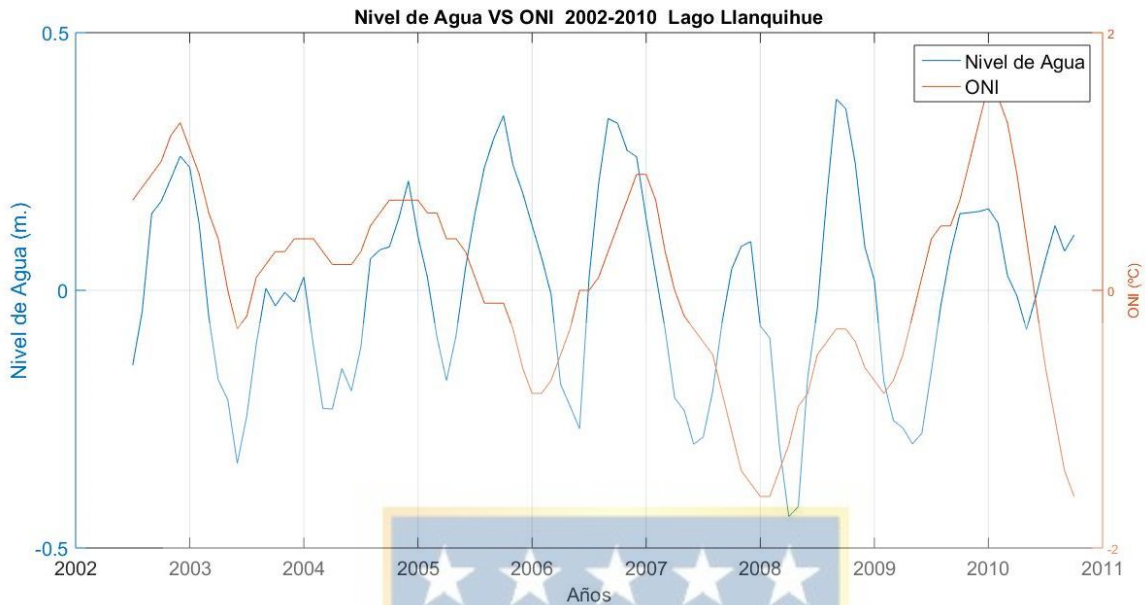
Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados
Regresión	1	0.769	0.769
Error	98	3.545	0.036
Total	99	4.314	

Tabla 10: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Llanquihue. 2002-2010.

Año	Variación Anual (mm)
2002 *	366
2003	-135
2004	179
2005	68
2006	42
2007	-134
2008	78
2009	301
2010 *	-48

\* Año con datos altimétricos faltantes.

Tabla 11: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Llanquihue. 2002-2010.



*Figura 18: Nivel de Agua VS ONI. Lago Llanquihue. 2002-2010.*

Analizando las variaciones anuales del nivel de agua del lago Llanquihue en el periodo 2002-2010 (Ver Tabla 11), se logró determinar los años de crecidas y estiajes, los cuales corresponden a:

- Crecidas: 2002, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009.
- Estiajes: 2003, 2007, 2010.

En el periodo comprendido entre los años 2002 y 2003 existió una variación negativa del nivel de agua del lago, coincidente con el fenómeno El Niño presente a finales del año 2002 y principios del año 2003. Entre los años 2004 y 2005 pese a tener variaciones anuales positivas esta disminuyó, lo que puede estar asociado a la presencia del fenómeno El Niño a finales del año 2004 y principios del año 2005. Entre los años 2006 y 2007 existió una variación negativa del nivel de agua del lago; en este periodo se presentó tanto el fenómeno El Niño como La Niña de manera débil, visualmente no se puede

establecer una relación entre el fenómeno ENSO y la variación del nivel de agua en este periodo, por lo que estas variaciones podrían estar asociadas a otra variable climática. Entre los años 2008 y 2009 hubo una variación positiva en el nivel de agua coincidente con la presencia del fenómeno La Niña a finales del año 2007 y principios del año 2009 (Ver Tabla 4 y 11) (Ver Fig.20).

En este periodo el lago alcanzó su cota máxima el año 2003 con un nivel de agua de 31.4 m.; su cota mínima la alcanzó el año 2008 con 30,5 m. Tiene una tendencia lineal negativa, cuya variación de nivel de agua disminuye en una razón de  $-36 \text{ mm. /año}$  (Ver Fig. 17).



### 6.1.4. Lago Llanquihue 2013-2016.



Figura 19: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Llanquihue 2013-2016.

Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados
Regresión	1	0.420	0.420
Error	36	1.761	0.049
Total	37	2.181	

Tabla 12: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Llanquihue. 2013-2016.

Año	Variación Anual (mm)
2013 *	231
2014	156
2015	14
2016 *	-328

\* Año con datos altimétricos faltantes.

Tabla 13: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Llanquihue. 2013-2016.



*Figura 20: Nivel de Agua VS ONI. Lago Llanquihue. 2013-2016.*

Analizando las variaciones anuales del nivel del agua del lago Llanquihue entre 2013-2016 (Ver Tabla 13), se pueden determinar los años de crecidas y estiajes, los cuales corresponden a:

- Crecidas: 2013, 2014, 2015.
- Estiajes: 2016.

En el periodo comprendido entre el año 2013 y mediados del año 2014 el fenómeno ENSO se mantuvo neutro, por lo que no se puede inferir que éste haya afectado al nivel de agua. No obstante, entre finales del año 2014 y principios del año 2016 se presentó el fenómeno El Niño fuertemente, coincidente con la disminución del nivel de agua en dicho periodo (Ver Tabla 4 y 13) (Ver Fig.20). En este periodo el lago alcanzó su cota máxima el año 2014 con un nivel de agua de 31.3m.; mientras que su cota mínima la alcanzó el año 2016 con 30,5 m. Tiene una tendencia lineal negativa, cuya variación de nivel de agua disminuye en una razón de -115 mm. /año (Ver Fig.19).



### 6.1.5. Lago Todos Los Santos 2002-2018.

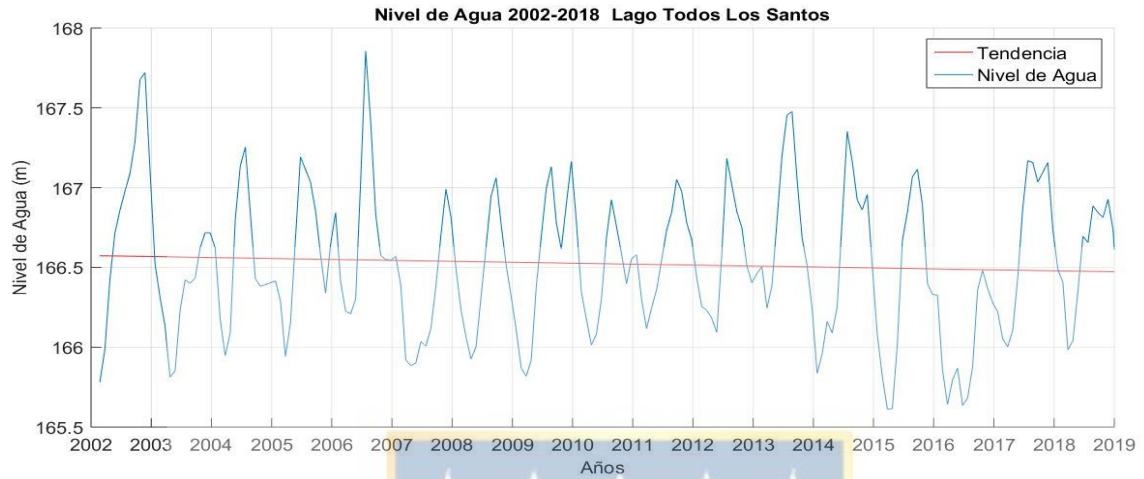


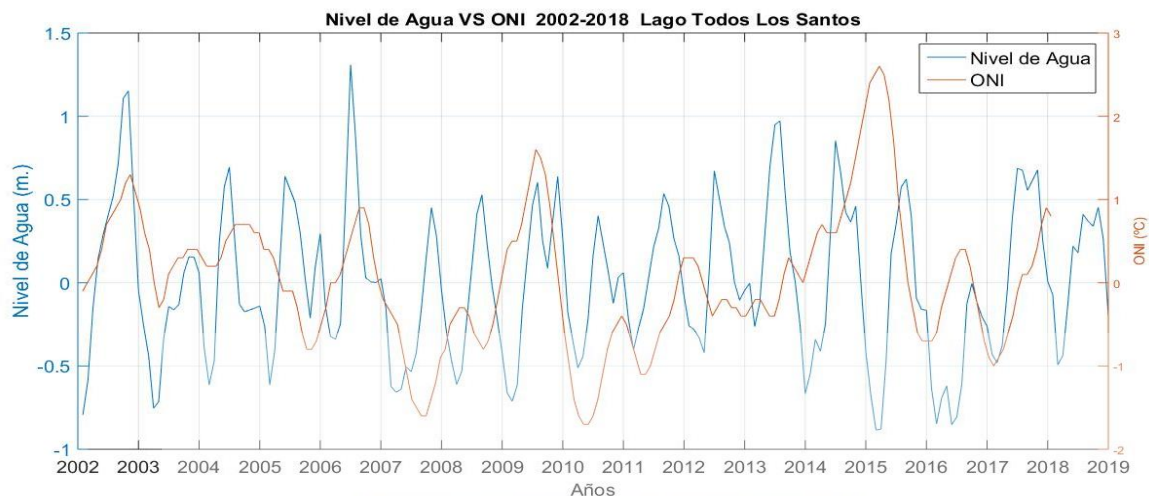
Figura 21: Serie Temporal Nivel de Agua - Lago Todos Los Santos 2002-2018.

Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados
Regresión	1	0.173	0.173
Error	202	40.466	0.200
Total	203	40.639	

Tabla 14: Análisis de Varianza para Regresión Lineal. Lago Todos Los Santos. 2002-2018.

Año	Variación Anual (mm)
2002	743
2003	308
2004	243
2005	553
2006	157
2007	104
2008	-124
2009	920
2010	233
2011	135
2012	208
2013	-669
2014	122
2015	508
2016	366
2017	434
2018	-134

Tabla 15: Variación Anual de Nivel de Agua. Lago Todos Los Santos. 2002-2018



*Figura 22: Nivel de Agua VS ONI. Lago Todos Los Santos.2002-2018.*

Analizando las variaciones anuales del nivel de agua del lago Todos Los Santos entre el periodo 2002-2018 (Ver Tabla 15), se pudo determinar los años de crecidas y estiajes:

- Crecidas: 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017.
- Estiajes: 2008, 2013, 2018.

En el periodo comprendido entre mediados del año 2002 y finales del año 2006 al igual que el periodo comprendido entre el año 2015 y principios del año 2016 existe principalmente actividad del fenómeno El Niño, pese a que las variaciones anuales en este periodo del nivel de agua son positivas han ido disminuyendo con el transcurso de los años, esto podría ser causado por la ausencia de precipitaciones producidas por El Niño. Entre los años 2011 y 2012 existe un aumento en la variación positiva del nivel de agua del lago, coincidente con la presencia del fenómeno La Niña a finales del año 2010 y principios del año 2012 (Ver Tabla 4 y 15) (Ver Fig.22).

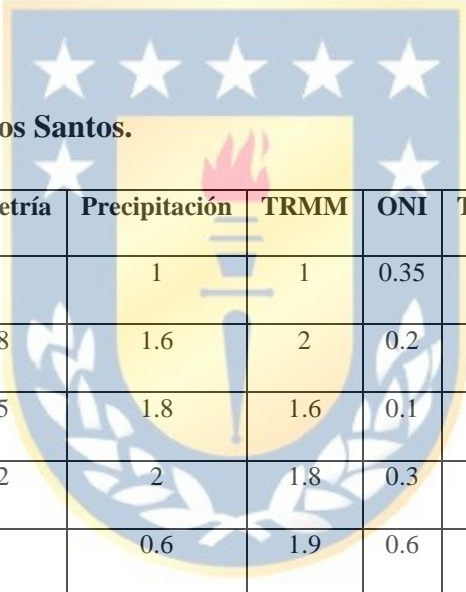
Durante el periodo 2008-2009 al igual que el 2016-2018 existe actividad de La Niña, y que coincide en gran parte con el aumento positivo de la variación anual del nivel de agua en ese periodo. El lago alcanzó su cota máxima el año 2006 con un nivel de agua de 167, 9 m.; mientras que la cota mínima alcanzó 165,6 m. Tiene una tendencia lineal negativa, cuya variación de nivel de agua disminuye en una razón de -6 mm. /año (Ver Fig.21).



## 6.2. Periodogramas.

Los periodogramas grafican las frecuencias y sus respectivas amplitudes de las señales. Cada periodograma corresponde a: Nivel de Agua, ONI, TRMM, precipitaciones, temperatura (Ver Anexos 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6); estos serán comparados entre sí para indicar la cercanía de las frecuencias predominantes, y determinar si existe relación entre dichas variables. Las cinco primeras frecuencias predominantes de cada variable se presentarán a continuación en tablas.

### 6.2.1. Lago Todos Los Santos.



Frecuencia	Altimetría	Precipitación	TRMM	ONI	Temperatura
F1	1	1	1	0.35	1
F2	0.8	1.6	2	0.2	2
F3	0.5	1.8	1.6	0.1	0.5
F4	0.2	2	1.8	0.3	0.1
F5	2	0.6	1.9	0.6	0.3

*Tabla 16: Frecuencias Predominantes. Lago Todos Los Santos.2002-2018.*

### 6.2.2. Lago Llanquihue 2002-2010.

Frecuencia	Altimetría	Precipitación	TRMM	ONI	Temperatura
F1	0.9	0.9	0.9	0.1	0.9
F2	1.1	1.1	1.1	0.7	1.1
F3	0.2	0.7	1.2	0.4	0.8
F4	0.7	1.2	1.9	0.5	0.2
F5	1.2	1.6	2	0.6	1.2

Tabla 17: Frecuencias Predominantes. Lago Llanquihue. 2002-2010.

### 6.2.3. Lago Llanquihue 2013-2016.

Frecuencia	Altimetría	Precipitación	TRMM	ONI	Temperatura
F1	0.9	0.9	0.9	0.3	0.9
F2	0.3	1.9	1.9	0.6	0.6
F3	1.3	1.3	1.3	1	0.3
F4	1.6	1.6	1.6	1.3	1.6
F5	0.6	0.3	2.2	1.9	1.3

Tabla 18: Frecuencias Predominantes. Lago Llanquihue. 2013-2016.

#### 6.2.4. Lago Ranco 2002-2010.

Frecuencia	Altimetría	Precipitación	TRMM	ONI
F1	0.9	0.9	0.9	0.1
F2	1.2	1.1	1.1	0.7
F3	1.1	1.9	1.9	0.4
F4	0.2	1.2	2	0.6
F5	1.9	1.5	1.2	0.5

Tabla 19: Frecuencias Predominantes. Lago Ranco. 2002-2010.

#### 6.2.5. Lago Ranco 2013-2018.

Frecuencia	Altimetría	Precipitación	TRMM	ONI	Temperatura
F1	1	1	1	0.2	1
F2	0.9	0.8	0.9	0.4	0.9
F3	0.7	0.6	1.9	0.7	0.2
F4	0.2	1.2	0.7	0.5	1.2
F5	1.2	0.4	1.4	0.9	0.7

Tabla 20: Frecuencias Predominantes. Lago Ranco. 2013-2018.

De acuerdo a los periodogramas correspondientes a los lagos estudiados se pudo determinar que existen frecuencias predominantes y coincidentes entre los periodogramas de nivel de agua, temperatura, TRMM, y precipitación (Ver tablas 16, 17, 18, 19 y 20). Lo que permite determinar que dichas variables climáticas están relacionadas y pueden ser contribuidoras entre ellas mismas. Sin embargo, los periodogramas correspondientes al índice ONI no expresan muchos ciclos relevantes y a la vez coincidentes con los periodogramas de las demás variables climáticas, por lo que esta puede contribuir en menor medida.



### 6.3. Correlaciones.

En esta sección se presentan los resultados estadísticos obtenidos (Desviación estándar (SD), Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson ( $\rho$ )) entre los datos de altimetría y: ONI, temperatura, TRMM, y precipitación para cada lago y sus respectivos periodos de estudio. Además, se presentan Diagramas de Taylor que representan gráficamente los estadísticos mencionados anteriormente.

#### 6.3.1. Correlaciones Lago Todos Los Santos.

Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.445	0	1
ONI	0.816	0.906	0.058
TEMPERATURA	2.337	2.629	-0.602
TRMM	60.253	59.927	0.734

Tabla 21: Resultados estadísticos de variables climáticas respecto a Altimetría. Lago Todos Los Santos.

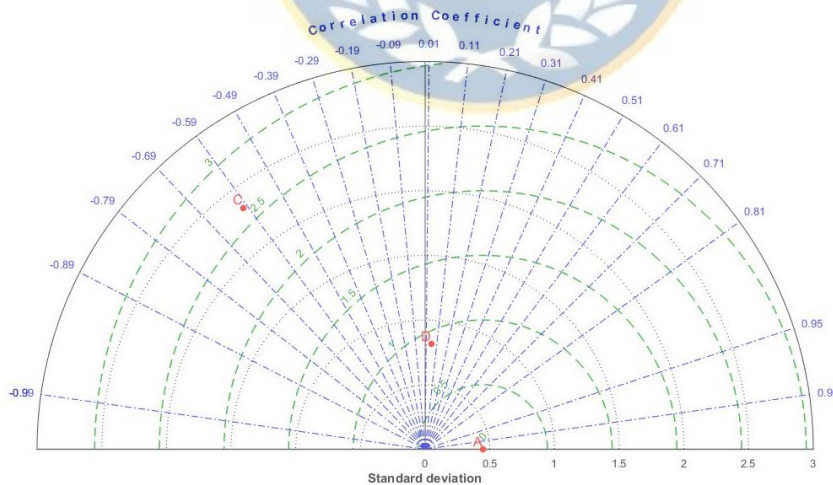


Figura 23: Diagrama de Taylor .Lago Todos Los Santos. A: Altimetría. C: Temperatura. D: ONI.



Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.469	0	1
PRECIPITACIONES	74.772	74.443	0.747

Tabla 22: Resultados estadísticos de Precipitación in situ respecto a Altimetría. Lago Todos Los Santos.

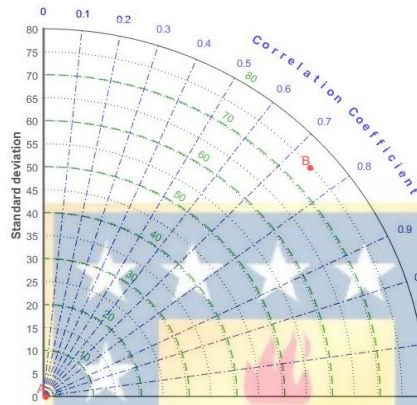


Figura 24: Diagrama de Taylor. Lago Todos Los Santos. A: Altimetría. B: Precipitaciones In Situ.

En las tablas 21 y 22 como en las figuras 23 y 24 se puede observar la correlación negativa entre nivel de agua y temperatura, mientras que también se observa la correlación positiva con precipitaciones *in-situ*, TRMM, y ONI. Pese a que con esta última variable la correlación es positiva pero no alta, se puede apreciar una tendencia positiva del nivel de agua ante la ocurrencia del fenómeno ENSO (Ver Fig. 22). La correlación entre el nivel de agua y: temperatura y precipitaciones fue moderada, esto permite inferir que estas variables son inversa y directamente proporcional respectivamente y tienen contribución en la variación del nivel de agua.

Ítem	Alt. Vs ONI	Alt. Vs TRMM	Alt. Vs PPT	Alt. Vs Temp.
Valor Test (t)	0,604	1,000	0,995	1,000
Valor Critico (tc)	1,968	1,972	2,002	1,971
Acepta o Rechaza $H_0$	Acepta	Acepta	Acepta	Acepta

Tabla 23: Resultados Test-t para variables climáticas. Lago Todos Los Santos. 2002-2018.

### 6.3.2. Lago Llanquihue 2002-2010.

Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.188	0	1
ONI	0.746	0.714	0.292
TEMPERATURA	2.311	2.354	-0.185
TRMM	54.507	54.492	0.080
PRECIPITACION	60.603	60.568	0.188

Tabla 24: Resultados estadísticos. Lago Llanquihue, periodo 2002-2010.

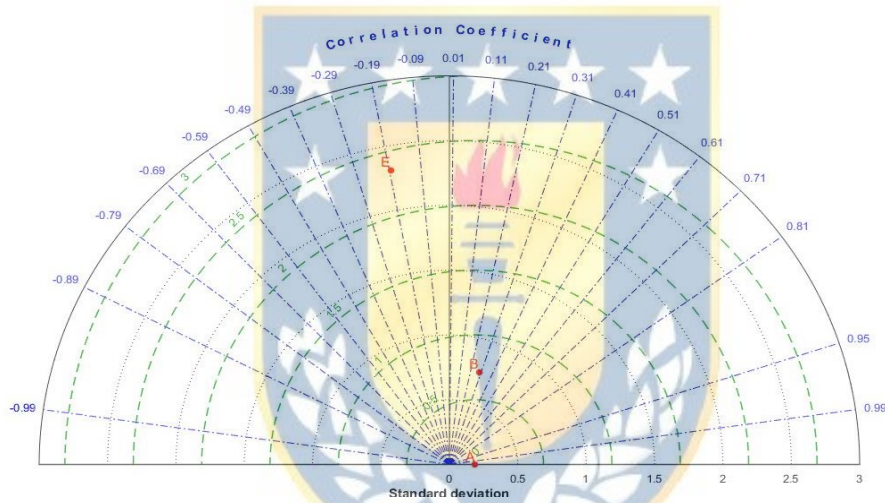


Figura 25: Diagrama de Taylor Lago Llanquihue 2002-2010. A: Altimetría, B: ONI ,E: Temperatura.

En la tabla 24 como en la figura 25 se puede observar la correlación negativa entre altimetría y temperatura, mientras que también se observa la correlación positiva con precipitaciones *in-situ*, TRMM, y ONI. Pese a que con esta última variable la correlación es positiva pero no alta, se puede apreciar una tendencia positiva del nivel de agua ante la ocurrencia del fenómeno ENSO (Ver Fig. 18). La correlación entre el nivel de agua y: temperatura y precipitaciones, permite inferir que estas variables son inversa y directamente proporcional respectivamente a la variación del nivel de agua.

Ítem	Alt. Vs ONI	Alt. Vs TRMM	Alt. Vs PPT	Alt. Vs Temp.
Valor Test (t)	0,562	0,659	0,744	0,463
Valor Critico (tc)	1,981	1,984	1,984	1,984
Acepta o Rechaza H <sub>0</sub>	Acepta	Acepta	Acepta	Acepta

Tabla 25: Resultados Test-t para variables climáticas. Lago Llanquihue 2002-2010.

### 6.3.3. Lago Llanquihue 2013-2016.

Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.205	0	1
ONI	0.953	0.923	0.253
TEMPERATURA	2.199	2.282	-0.367
TRMM	56.059	56.062	0.017
PRECIPITACION	72.567	72.564	0.014

Tabla 26: Resultados estadísticos. Lago Llanquihue, periodo 2013-2016.

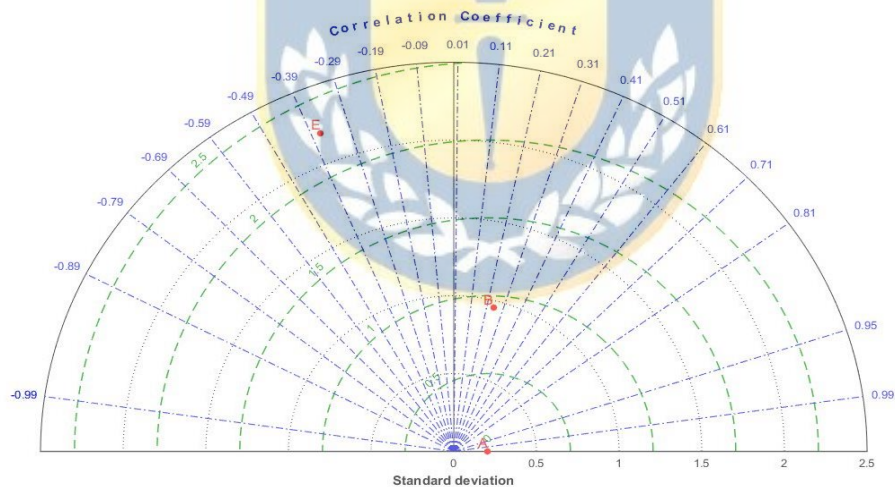


Figura 26: Diagrama de Taylor. Lago Llanquihue 2013-2016. A: Altimetría, B: ONI, E: Temperatura.

En la tabla 26 y figura 26 se puede observar la correlación negativa entre altimetría y temperatura, mientras que también se observa la correlación positiva con precipitaciones *in-situ*, TRMM, y ONI. La correlación con la variable ONI es positiva pero no alta, sin embargo, se puede apreciar una tendencia positiva del nivel de agua ante la ocurrencia del fenómeno ENSO (Ver Fig. 20). La correlación entre el nivel de agua y: temperatura y precipitaciones, permite inferir que estas variables son inversa y directamente proporcional respectivamente a la variación del nivel de agua

Ítem	Alt. Vs ONI	Alt. Vs TRMM	Alt. Vs PPT	Alt. Vs Temp.
Valor Test (t)	0,003	0,322	0,966	0,905
Valor Critico (tc)	2,030	2,037	2,037	2,035
Acepta o Rechaza $H_0$	Acepta	Acepta	Acepta	Acepta

*Tabla 27: Resultados Test-t para variables climáticas. Lago Llanquihue. 2013-2018.*

Tanto en el periodo 2002 – 2010, como en el periodo 2013- 2018 las correlaciones con las variables climáticas (Precipitaciones, temperatura) fueron bajas, esto puede significar que estas variables contribuyen en baja medida en la variación del nivel de agua del Lago Llanquihue, esto podría estar asociado a la gran superficie que posee este lago. No obstante, como fue mencionado anteriormente pese a que se obtuvo una correlacion baja con el índice ONI existe una tendencia positiva de la variación del nivel de agua con la actividad del fenómeno ENSO, en ambos periodos de estudio.

### 6.3.4. Lago Ranco 2002-2010.

Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.563	0	1
ONI	0.763	0.847	0.212
TRMM	53.012	52.756	0.472
PRECIPITACION	73.832	73.541	0.520

Tabla 28: Resultados estadísticos. Lago Ranco, periodo 2002-2010.

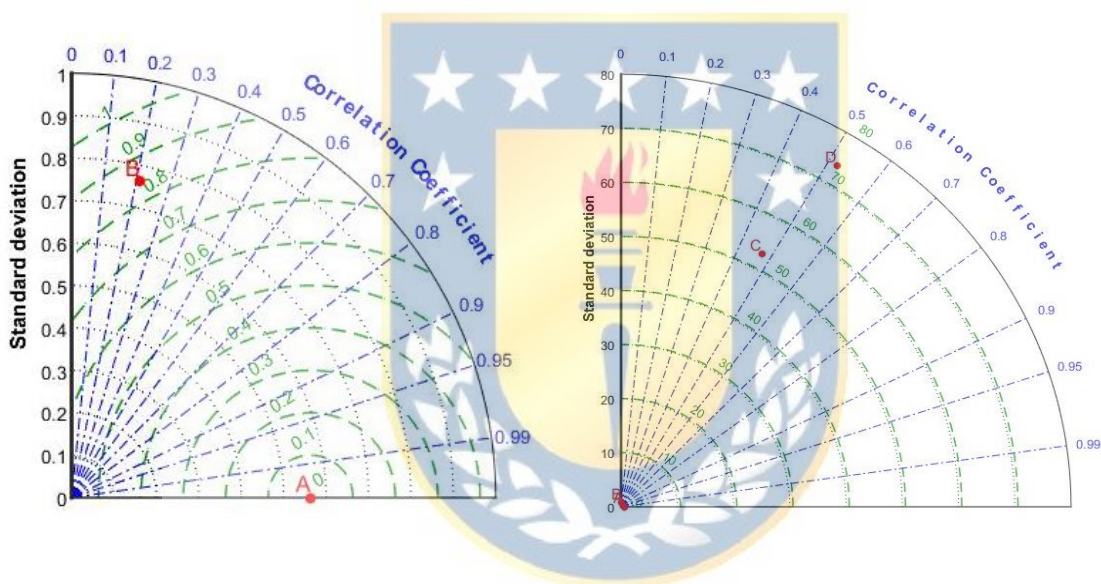


Figura 28: Diagrama de Taylor Lago Ranco 2002-2010. A: Altimetría, B: ONI.

Figura 27: Acercamiento Fig.33, C: TRMM, D: Precipitaciones.

En la tabla 28 como en las figuras 28 y 27 se puede observar la correlación positiva existente entre altimetría, ONI, precipitaciones, y TRMM; esto indica que estas variables son directamente proporcionales a la variación de nivel de agua. Mientras que la correlación con temperatura es negativa, por lo que su relación con la variación de nivel de agua es indirectamente proporcional.

Pese a que ONI obtuvo una correlación positiva pero baja, se puede apreciar una tendencia positiva del nivel de agua ante la ocurrencia del fenómeno ENSO (Ver Fig. 14).

Ítem	Alt. Vs ONI	Alt. Vs TRMM	Alt. Vs PPT
Valor Test (t)	0,826	0,927	0,769
Valor Critico (tc)	1,973	1,984	1,984
Acepta o Rechaza $H_0$	Acepta	Acepta	Acepta

Tabla 29: Resultados Test-t para variables climáticas. Rancho, 2002-2010.

### 6.3.5. Lago Rancho 2013-2018.

Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.591	0	1
ONI	0.888	1.040	0.053
TEMPERATURA	2.448	2.903	-0.721
TRMM	45.950	45.539	0.699

Tabla 30: Resultados estadísticos. Lago Rancho, periodo 2013-2018.

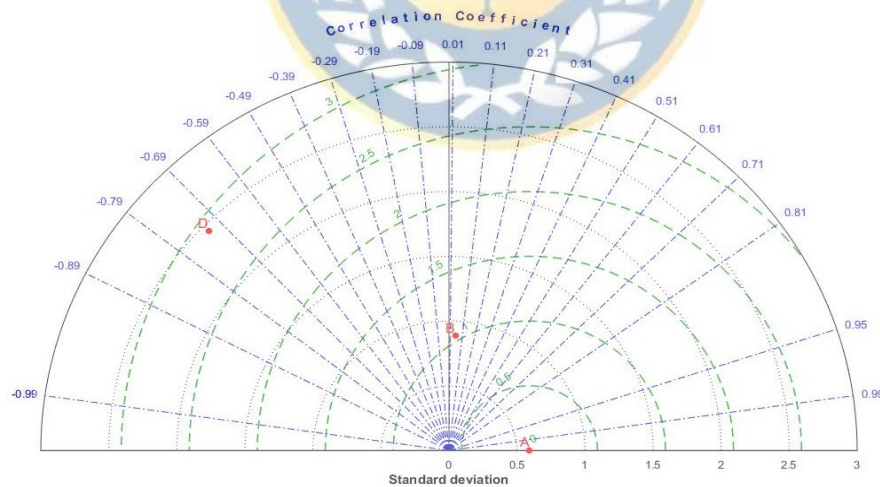


Figura 29: Diagrama de Taylor Lago Rancho 2013-2018. A: Altimetría, B: ONI, D: Temperatura.

Variable	SD	RMSE	$\rho$
ALTIMETRIA	0.607	0	1
PRECIPITACION	59.570	59.339	0.384

Tabla 31: Resultados estadísticos de Precipitación in situ respecto a Altimetría. Lago Ranco. 2013-2018.

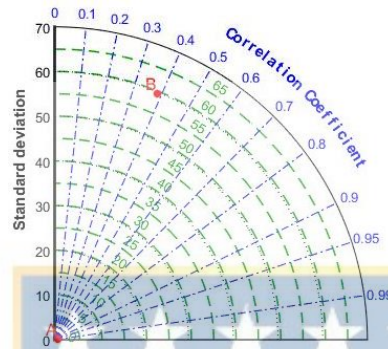


Figura 30: Diagrama de Taylor Lago Ranco 2013-2018. A: Altimetría, B: Precipitaciones.

En la tablas 30 y 31 como en las figuras 29 y 30 se puede observar la correlación positiva existente entre altimetría, ONI, precipitaciones, y TRMM; esto indica dichas variables son directamente proporcionales a la variación de nivel de agua. Mientras que la correlación con temperatura es negativa, por lo que su relación con la variación de nivel de agua es indirectamente proporcional. En este periodo ONI obtuvo una correlación positiva y más baja que el periodo anterior estudiado, no obstante, es posible apreciar visualmente una tendencia positiva del nivel de agua ante la ocurrencia del fenómeno ENSO (Ver Fig.16).

Ítem	Alt. Vs ONI	Alt. Vs TRMM	Alt. Vs PPT	Alt. Vs Temp.
Valor Test (t)	0,043	0,863	0,813	0,934
Valor Critico (tc)	1,980	1,995	2,002	1,992
Acepta o Rechaza $H_0$	Acepta	Acepta	Acepta	Acepta

Tabla 32: Resultados Test-t para variables climáticas. Ranco. 2013-2018.

Tanto en el periodo 2002 – 2010, como en el periodo 2013- 2018 se presentaron en el Lago Ranco correlaciones bajas y moderadas con las variables climáticas (Precipitaciones, temperatura), esto significa que dichas variables contribuyeron en la variación del nivel de agua del Lago Ranco en los periodos estudiados. Pese a que se obtuvo una correlación baja y positiva con el índice ONI, existe una tendencia positiva de la variación del nivel de agua con la actividad del fenómeno ENSO, en ambos periodos de estudio.





## 7. Conclusiones y discusiones.

A partir de observaciones de altimetría satelital se confeccionaron series temporales del nivel de agua, con las cuales fue posible analizar las tendencias lineales, establecer las variaciones anuales, análisis cíclicos y correlación de variables climáticas con el nivel de agua de los lagos Todos Los Santos, Llanquihue y Ranco en el periodo 2002-2018.

Las tendencias lineales arrojan que todos los lagos estudiados poseen una tendencia negativa en los periodos estudiados respectivamente, esto significa que en dichos periodos el nivel de agua tiende a la disminución. Los ANOVA en todas las regresiones lineales de las series temporales determinaron que la hipótesis nula es rechazada, por lo que esto determina que si son estadísticamente significativas.

Se ha podido establecer los años de crecidas y estiajes para cada lago y periodo respectivo, con lo que se logró determinar visualmente que la variación anual del nivel de agua se ve influenciada por la actividad del fenómeno ENSO; donde su nivel de agua tiende a aumentar con la presencia del fenómeno La Niña, la cual tiene periodos húmedos y lluviosos, como también tiende a disminuir con la presencia del fenómeno El Niño, el cual tiene periodos secos y ausencia de precipitaciones.

A través de la Transformada Discreta de Fourier fue posible construir periodogramas, con los cuales se analizaron las componentes cíclicas de las variables climáticas consideradas en este estudio. Se pudo establecer que las variables climáticas (temperatura y precipitación) poseen las mismas frecuencias predominantes que los periodogramas de nivel de agua, determinando así que dichas variables tienen relación y contribución en la variación del nivel de agua de los lagos estudiados. El índice ONI en este análisis no obtuvo muchas frecuencias predominantes y a la vez coincidentes con los periodogramas

de nivel de agua, estableciendo de esta forma que pese a que existe una contribución en la variación de nivel de agua esta no es alta.

Finalmente las variables climáticas fueron correlacionadas con el nivel de agua de los lagos, esto mediante el coeficiente de correlación de *Pearson*, donde se logró establecer que los lagos estudiados tienen una correlación positiva con las variables climáticas precipitaciones *in-situ*, TRMM, y ONI; en el caso de esta última variable las correlaciones fueron bajas, esto establece que pese a ser positivas tienen una contribución baja en la variación de nivel de agua de los lagos estudiados, confirmando de esta manera lo establecido a través del análisis de ciclos. En el caso de la correlación de temperatura con nivel de agua se obtuvieron correlaciones negativas, por lo que se determina que esta variable es inversamente proporcional a la variación del nivel de agua de los lagos estudiados. Estas variables correlacionadas fueron evaluadas mediante la prueba estadística *t-student* con un nivel de 95% de confianza, donde los resultados indican la aceptación de la hipótesis nula y que sus diferencias no son estadísticamente significativas.

Dentro de esta investigación no fue considerado como variable de estudio la topografía del entorno del cuerpo de agua, la que puede influenciar en la fluctuación de masas de aire calientes y frías sobre las áreas de estudio, y por ende afectar en las variables climáticas estudiadas en esta investigación. También puede afectar en la relación del fenómeno ENSO con el área de estudio la distancia existente de estos cuerpos de agua respecto al Océano Pacífico. Es posible una investigación a futuro en la misma área de estudio pero como objeto de estudio la relación existente entre la actividad del fenómeno ENSO y las variables climáticas que fueron utilizadas en esta investigación.

## 8. Referencias

- Abtew, W., & Trimble, P. (2010). El Niño-Southern Oscillation Link to South Florida Hydrology and Water Management Applications. *Water Resources Management. Volume 24(15), December 2010, Pages 4255-4271.*
- Adler, R. F., J.-J. Wang, G. Gu, and George J. Huffman, 2009: A ten-year rainfall climatology based on a composite of TRMM products. *J. Meteorol. Soc. Japan, 87A, 281-293.*
- Alonso, A. M. (2009). Introduccional Análisis de Series Temporales. Recuperado 8 noviembre, 2019 de: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/amalonso/esp/seriestemporales.pdf>
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruíz, J. (2012). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña- Oscilación del Sur (ENSO). Ideam.
- AVISO. (2014). *ALTIMETRY HISTORY*. Obtenido de AVISO: <https://www.aviso.altimetry.fr/es/techniques/altimetria/history.html>
- Awange, J. L., Ogalo, L., Bae, K. H., Were, P., Omondi, P., Omute, P., & Omullo, M. (2008). Falling Lake Victoria wáter levels: Is climate a contributing factor? *Climatic Change. Volume 89, August 2008, Pages 281-297.*
- Awange, J. L., Sharifi, M. A., Ogonda, G., Wickert, J., Grafarend, E. W., & Omulo, M. A. (2008). The falling lake Victoria wáter level: GRACE, TRIMM and CHAMP satellite analysis of the lake basin. *Water Resources Management, Volume 22, Pages 775-796.*

- Belete, M., Diekkrüger, B., & Roehrig, J. (2017). Linkage between Water Level Dynamics and Climate Variability: The Case of Lake Hawassa Hydrology and ENSO Phenomena. *Climate. Volume 5, March 2017*.
- Biblioteca del Congreso Nacional. SIIT, B. C. N. (2016). Región de los Ríos. Recuperado 7 noviembre, 2019, de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region14/relieve.htm>
- Biblioteca del Congreso Nacional. SIIT, B. C. N. (2016). Región de los Lagos. Recuperado 8 noviembre, 2019, de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region10>
- Bobadilla Sancho, J., Gómez Vilda, P., & Bernal Bermúdez, J. (1999). La Transformada de Fourier: Una visión pedagógica. *Estudios de Fonética Experimental*.
- Braun, S. A. (2011). Tropical Rainfall Measuring Mission. *Senior Review Proposal*.
- Universidad de Chile (2005). *Curso Geografía Del Mar*. Obtenido de Fenómeno El Niño: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h73.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h73.html)
- Calmant, S., & Seyler, F. (2006). Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus - Geoscience*.
- Center for Climate and Resilience Research. (2013). Recuperado el 12 de 10 de 2019, de CR2: <http://www.cr2.cl/>.
- Chattopadhyay, A. K., & Chattopadhyay, T. (2014). Time Series Analysis. *Statistical Methods for Astronomical Data Analysis*, 217–240. doi:10.1007/978-1-4939-1507-1\_9
- Chelton, D. B., Ries, J. C., Haines, B. J., Fu, L. L., & Callahan, P. S. (2001). Chapter 1 Satellite Altimetry. *International Geophysics, Volume 69, December 2001*.
- Chipman, J. W. (2019). A multisensor approach to satellite monitoring of trends in lake area, water level, and volume. *Remote Sensing*, 2019, 11(2), 158.

- Cortes, I., Olmedo, M. (2011). Apoyo al programa de vigilancia de las normas de calidad secundaria del lago Llanquihue. *Octubre 2011*. Recuperado de: [www.cenma.cl/Pagina%20webLQA/5Estudios%20Ambientales/INFORME\\_TECNICO\\_PP01\\_LLANQUIHUE.pdf](http://www.cenma.cl/Pagina%20webLQA/5Estudios%20Ambientales/INFORME_TECNICO_PP01_LLANQUIHUE.pdf)
- DAHITI. (2016). *TUM*. Recuperado el 15 de 11 de 2019, de TUM: <https://dahiti.dgfi.tum.de/en/>
- Dirección General de Aguas. (2016). Atlas Del Agua Chile 2016. Recuperado 8 noviembre, 2019, de: <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/1382>
- Dirección General de Aguas. (2017). *Datos Hidrológicos*. Recuperado el 20 de Julio de 2019, de Dirección General de Aguas: <http://www.dga.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx>
- Eicker, A., Schumacher, M., Kusche, J., Döll, P., and Schmied, H.: Calibration/Data Assimilation Approach for Integrating GRACE Data into the Water GAP Global Hydrology Model (WGHM) Using an Ensemble Kalman Filter: First Results, *Surv. Geophys.*, 35, 1285–1309, doi: 10.1007/s10712-014-9309-8, 2014.
- ESRL Physical Sciences Division (2009). Recuperado el 20 del 11 de 2019, de ESRL: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/>
- Gruber, C., Moon, Y., Flechtner, F., Dahle, C., Novák, P., König, R., and Neumayer, H.: Submonthly GRACE Solutions from Localizing Integral Equations and KalmanFiltering, in: *Earthon the Edge: Science for a Sustainable Planet*, edited by: Rizos, C. and Willis, P., vol. 139 of International Association of Geodesy Symposia, Springer, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642- 37222-3\_51, 383–389, 2014.

- Hou, A.; Gail, J.; Kummerow, C.; Marshall, J. 2011. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications* 18(3):334-353.
- L'Ecuyer, T. S., H. Masunaga, and C. D. Kummerow, 2006: Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical pacific. Part II: Implications for atmospheric heating. *J. Climate*, 19, 1388-1406
- Mathworks (2018). Suavizado de Señal. Recuperado el 15 del 12 de 2019, de Centro de Ayuda: <https://la.mathworks.com/help/signal/examples/signal-smoothing.html>
- Mathworks (2018). Detrending de datos. Recuperado el 15 del 12 de 2019, de Centro de Ayuda: [https://la.mathworks.com/help/matlab/data\\_analysis/detrending-data.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/detrending-data.html)
- Mathworks (2018). Polyfit. Recuperado el 15 del 12 de 2019, de Centro de Ayuda: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>
- Middleton, G.V. (2000). *Data Analysis in the Earth Sciences using Matlab*, 55-56.
- Nadeu, C., Gasull, A., Figueiras, A. Análisis espectral de series meteorológicas. A: Asamblea Española de Geodesia y Geofísica. "IV Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica: del 28 de septiembre al 2 de octubre de 1981: Zaragoza". Zaragoza: 1981, p. 182-183.
- Nakazawa, T., and K. Rajendran, 2009: Interannual variability of tropical rainfall characteristics and the impact of the altitude boost from TRMM PR 3A25 data. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 87A, 317-338.
- National Aeronautics and Space Administration. (1997). *TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>

- National Weather Service, (2017). Climate Prediction Center .Recuperado el 20 del 11 de 2019, de Climate Prediction Center: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- NOAA/CPC. (2015). National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center.
- Ochoa, A.; Pineda, L.; Crespo, P.; Willems, P. 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(8): 3179-3193.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1996). Las fases extremas del fenomeno ENSO (El Nino y La Nina) y su influencia sobre la hidrologia de Colombia. *Ingenieria Hidraulica En Mexico*.
- Restrepo B, Luis F, & González L, Julián (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2) ,183-192. [Fecha de Consulta 18 de Febrero de 2020]. ISSN: 0120-0690. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2950/295023034010>
- Revillod, M. (2018). Estudio de Sequias en las regiones XVI, VIII y IX mediante observaciones geodésicas en el periodo 2010-2015. Tesis de Pregrado. Universidad de Concepcion.
- Schuster, A. (1906). The Periodogram and Its Optical Analogy. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 77(515), 136–140. doi:10.1098/rspa.1906.0011

- Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., and Seitz, F.: DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4345–4364, <https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015>, 2015.
- Smith, S. W. (2003). Chebyshev Filters. In *Digital Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7444-7/50057-1>
- Smith, Steven W. *Digital Signal Processing. A Practical Guide for Engineers and Scientist*. Amsterdam: Newnes, Elsevier Science. 2003. ISBN: 0-750674-44-X.
- Smith, Steven The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing W., Second Edition, 1999, California Technical Publishing.
- Smola, A. J. and Scholkopf, B.: A Tutorial on Support Vector Regression, *Stat. Comput.*, 14,199-222. Doi:10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88,2004.
- Standardized Precipitation Index Variability in the Northern Region of Paraná State Associated with the El Niño - South. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 11–25.
- Terassi, P. M. de B., Oliveira-júnior, J. F. De, Góis, G. De, & Galvani, E. (2018). Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul
- U. C. de Chile (s.f.). *Curso Geografía Del Mar*. Obtenido de Fenómeno El Niño: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h73.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h73.html)
- Yang, Y. and Gao, W.: An Optimal Adaptive Kalman Filter, *J. Geodesy*, 80, 177-183, DOI:10.1007/S00190-006-0041-0, 2006.



## 9. Anexos

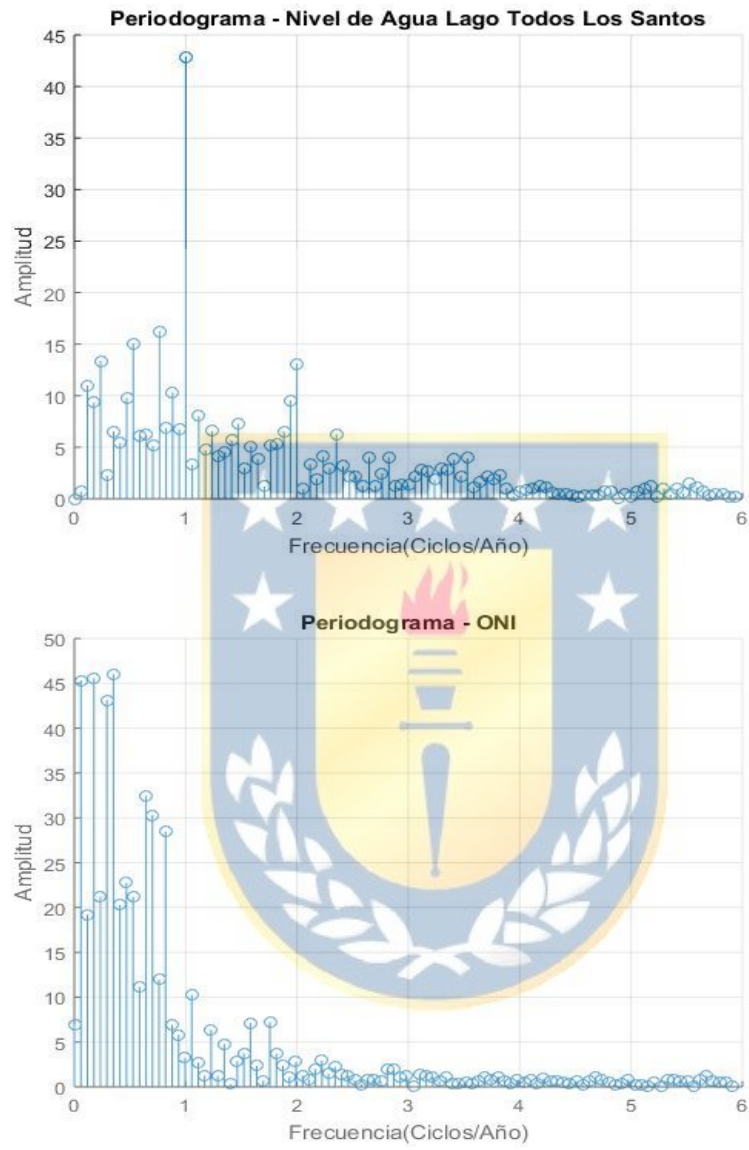
### 9.1. Script Transformada Discreta de Fourier.

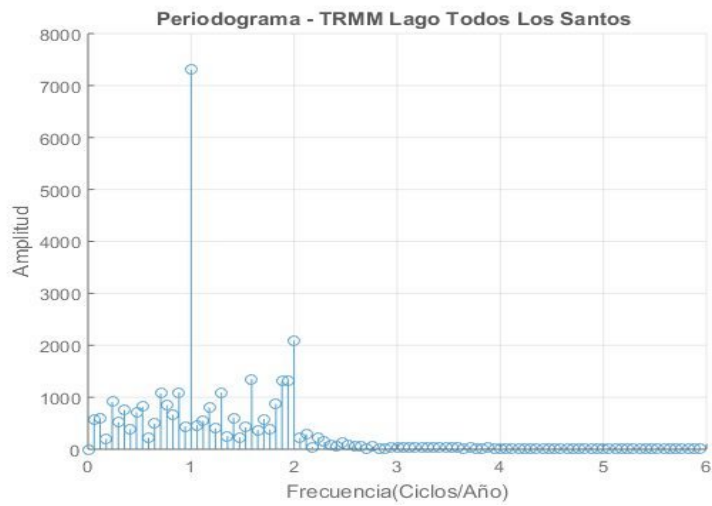
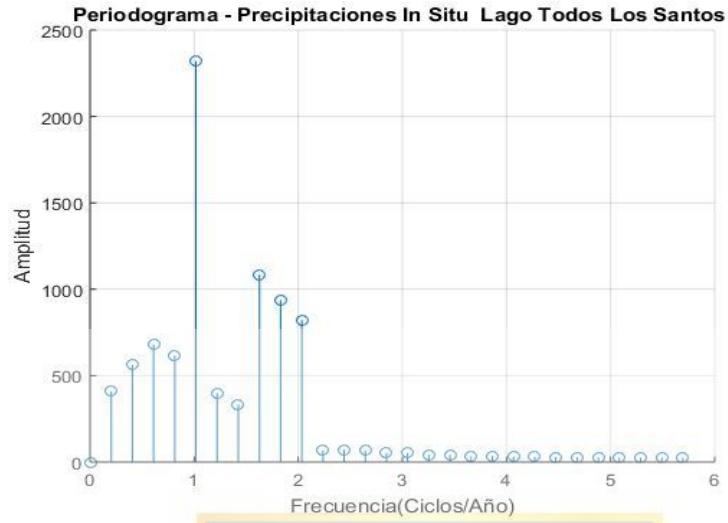
```
% Script que permite realizar análisis de tendencia y analisis espectral
mediante Transformada Discreta de Fourier de series temporales de
altimetria satelital.
%Nombre Alumno: Alvaro Ortiz Barría.
%Nombre profesor patrocinante: Henry Montecino Castro.
%input: vectores epoch y dato altimetrico.
%formato: .txt
%Output: Serie temporal, Periodograma, Archivo .txt con datos a
utilizar en correlaciones.
%Fecha: Marzo,2020.
clc ;clear all
data=load('dat_tls.txt');
epochdata=data(:,1);heightdata=data(:,2);
%Interpolacion de datos mensuales faltantes
epoch_alt=(2002.146347:0.08333333333400788:2019.073973)';
height_alt=(interp1(epochdata,heightdata,epoch_alt));
TLS=[epoch_alt,height_alt];
%Tendencia Lineal.
r=polyfit(epoch_alt,height_alt,1);
r1=epoch_alt*r(1)+r(2);
%====SERIE TEMPORAL NIVEL DE AGUA=====%
figure
title('Nivel de Agua 2002-2018 Lago Todos Los Santos');
xlabel('Años'), ylabel('Nivel de Agua (m)');
hold on
p1=plot(epoch_alt,r1,'r');
p2=plot(TLS(:,1),TLS(:,2),'Linewidth',0.5);
legend([p1 p2],{'Tendencia','Nivel de Agua'});
grid on
%====ANALISIS ESPECTRAL NIVEL DE AGUA=====%
%Eliminar tendencia
dt=detrend(TLS(:,2));
N=length(dt);
z=zeros(1,N);
for k=0:N-1 % Transformada Discreta de Fourier
    for n=0:N-1
        z(k+1)=z(k+1)+dt(n+1)*exp((( -1i)*2*pi*k*n)/N);
    end
end
DFT=z';
n2=length(DFT);
T=mean(diff(TLS(:,1))); %Periodo de muestreo
Fs=1/T; %Frecuencia de muestreo
freq =(0:n2/2-1)*Fs/n2; % Frecuencias hasta la Frecuencia de Nyquist
ap=abs(DFT(1:(n2/2))).^2; % Calcula el valor absoluto de la primer
mitad de los datos transformados
amp=sqrt(ap); % Calcula la amplitud
figure
```

```
title('Periodograma - Nivel de Agua Lago Todos Los Santos')
xlabel('Frecuencia (Ciclos/Año)');
ylabel('Amplitud');
hold on
stem(freq, amp);
grid on
%=====Preparar datos para correlaciones=====
dt=detrend(dat_fecha(:,4)); %Eliminar tendencias
data=table([dat_fecha(:,1),dat_fecha(:,2),dat_fecha(:,3),dt]);
writetable(data,'corr_altimetry_tlsantos.txt','delimiter',' ');
```

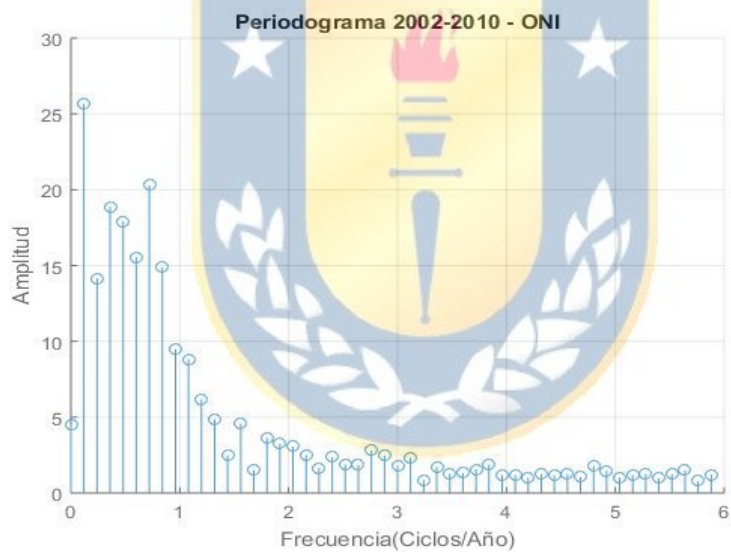
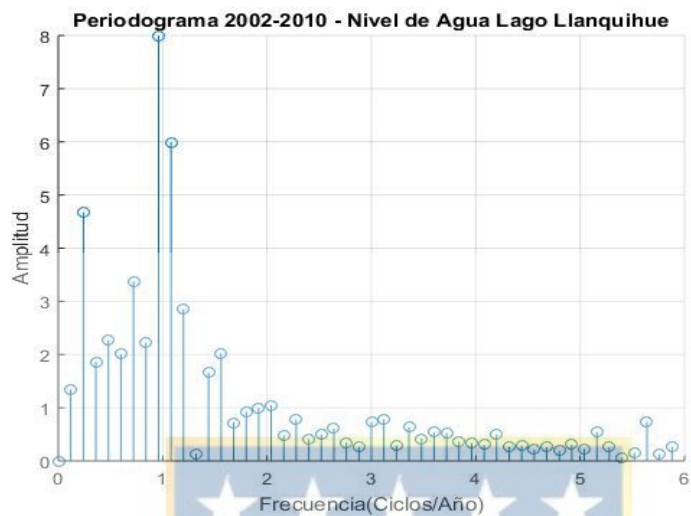


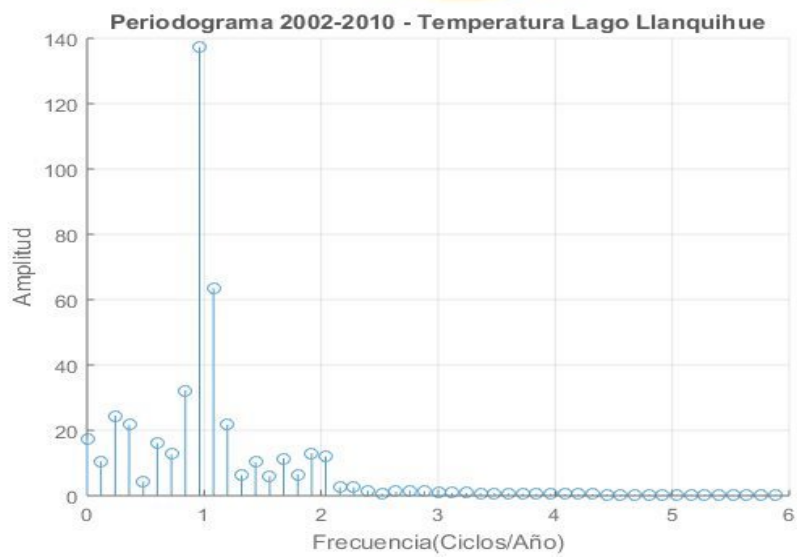
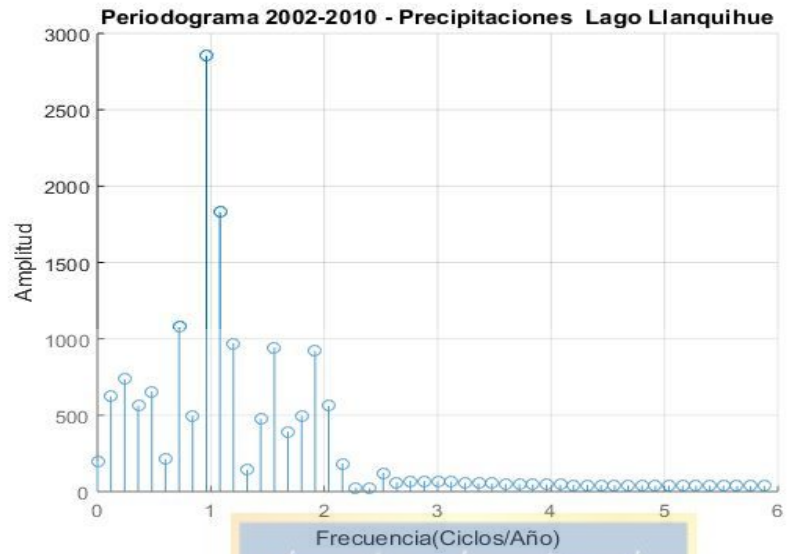
## 9.2. Periodogramas Lago Todos Los Santos.



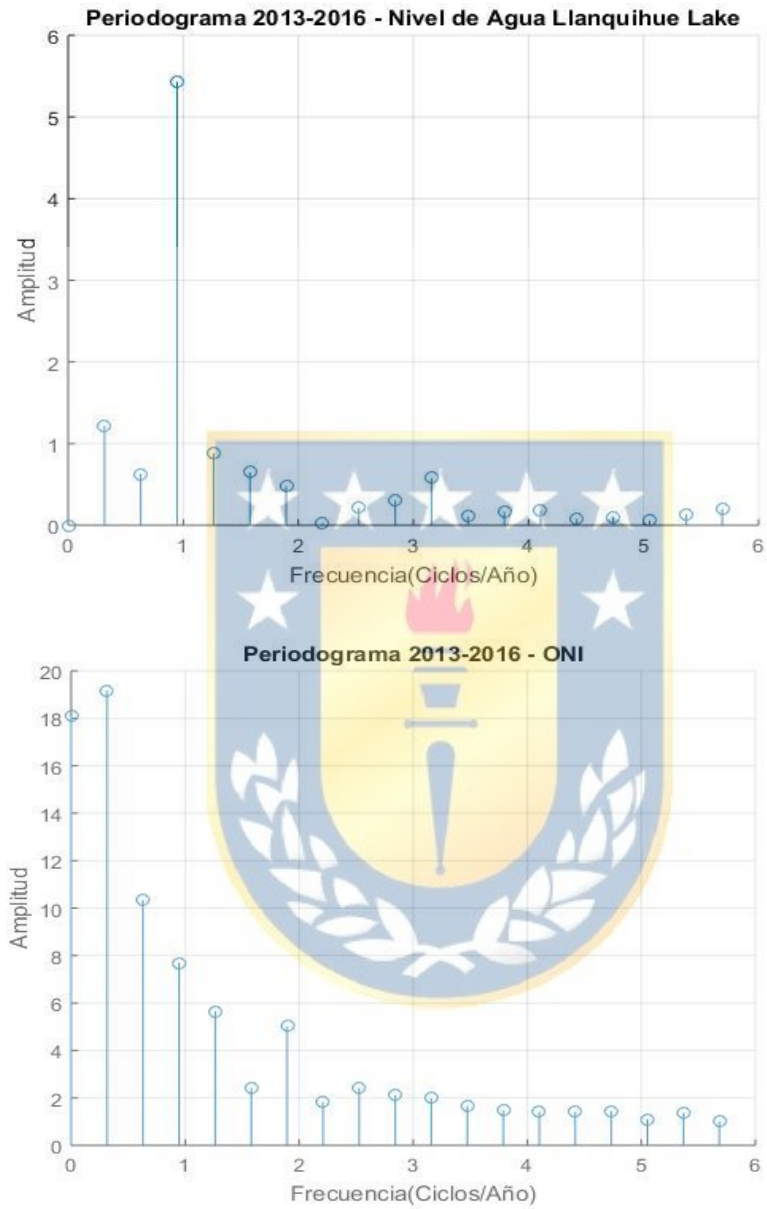


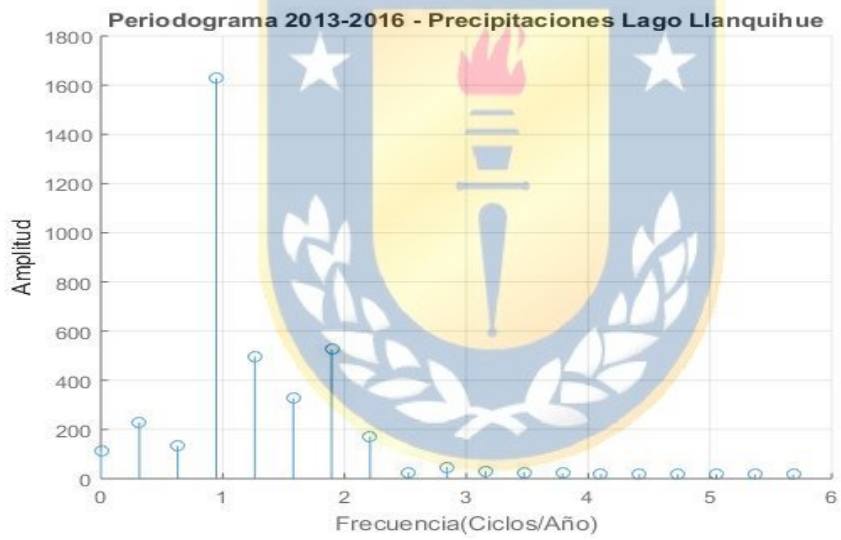
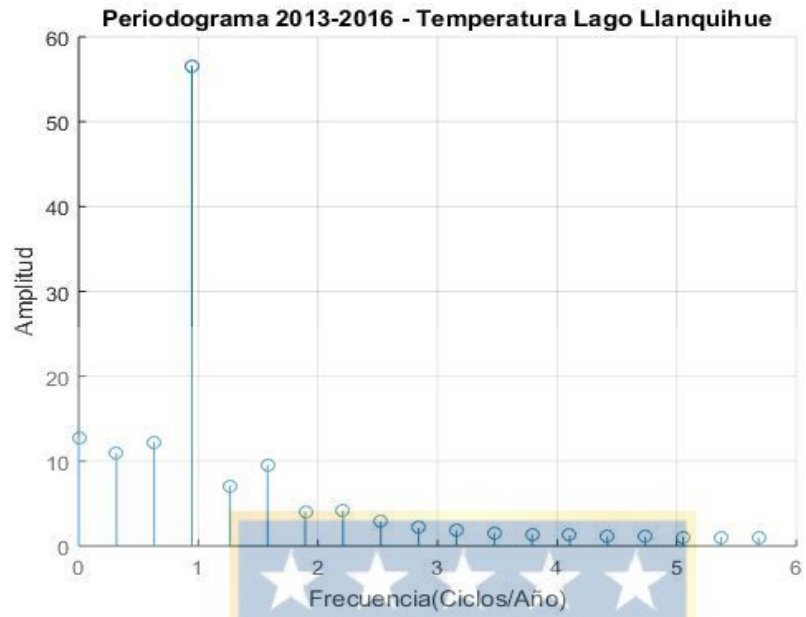
### 9.3. Periodogramas Lago Llanquihue 2002-2010.



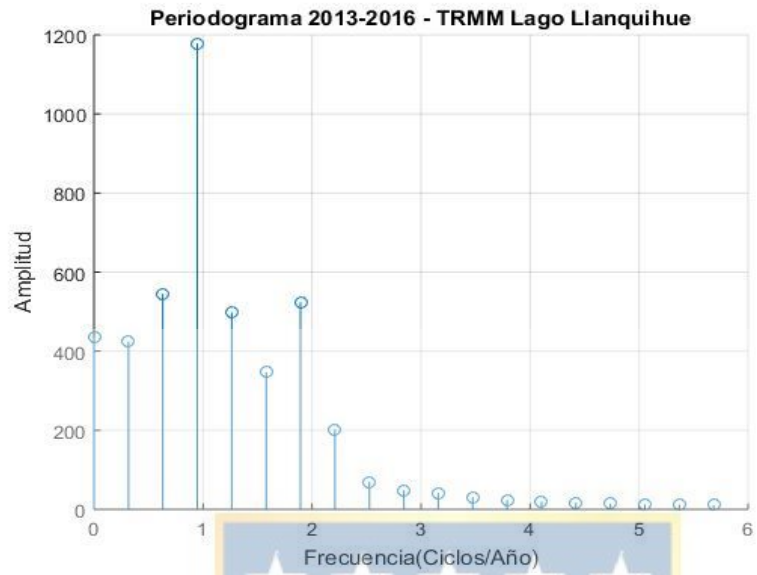


### 9.4. Periodogramas Lago Llanquihue 2013-2018.

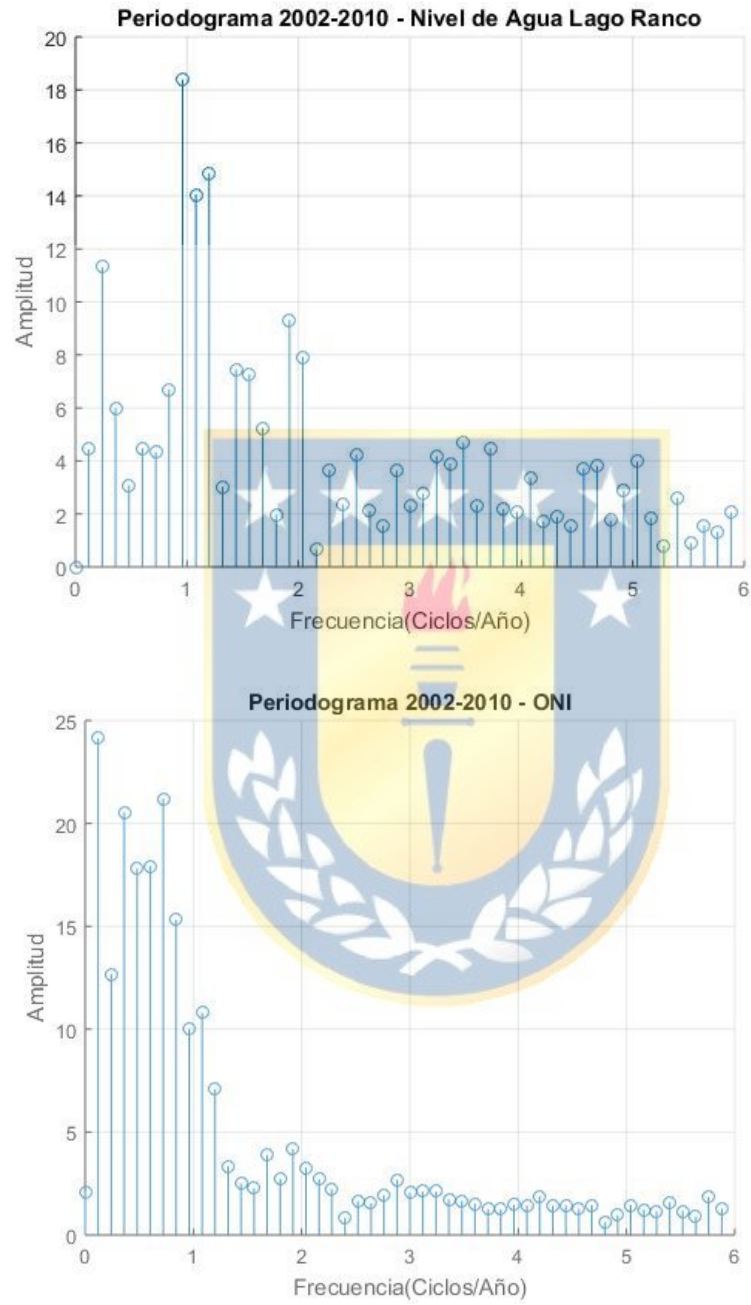


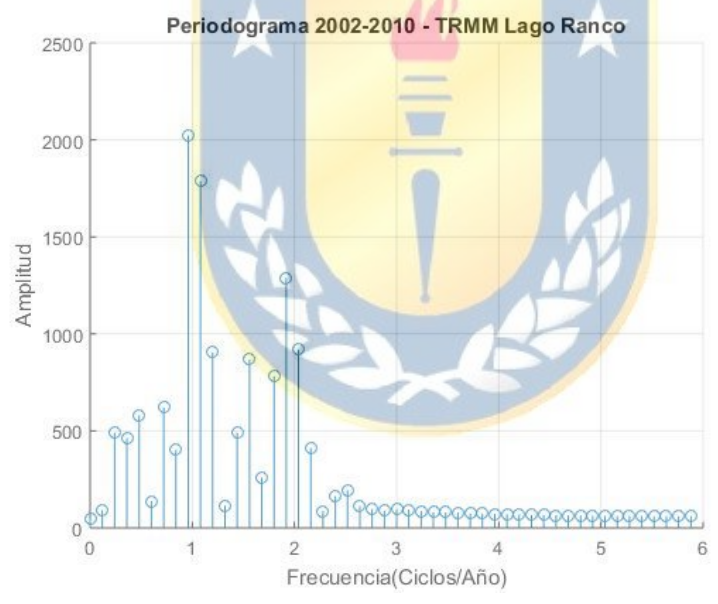
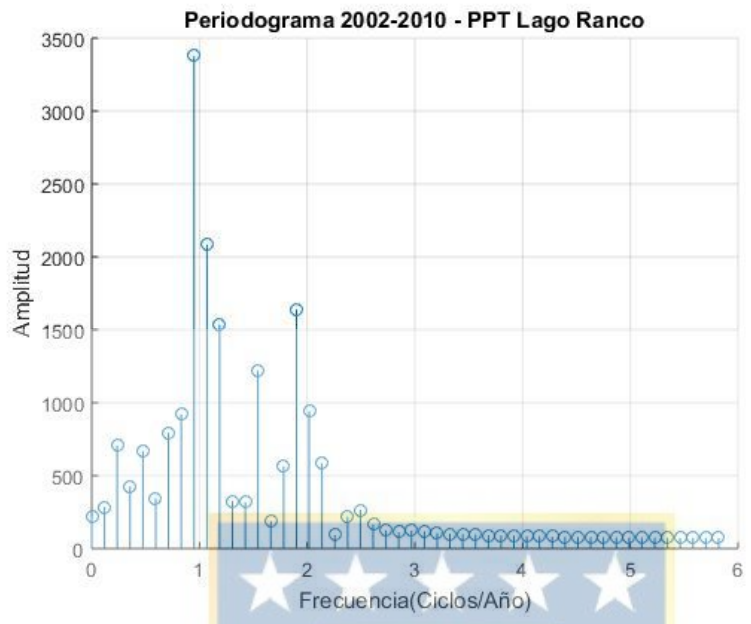






### 9.5. Periodogramas Lago Ranco 2002-2010.





### 9.6. Periodogramas Lago Ranco 2013-2016.

