

Artículo de investigación



Análisis del comportamiento en el tiempo de variables hidrológicas en las cuencas del río Petorca y del río La Ligua

Analysis of the behavior of hydrological variables in time in the Petorca and La Ligua river basins.

David Silva Muñoz^{1*}, Paulina Palacios Galaz¹

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 21 Septiembre 2021

Revisado 30 Septiembre 2022

Aceptado 3 Abril 2022

Publicado 8 Abril 2022

PALABRAS CLAVE

Cuenca, Precipitaciones,
Caudal, Consumo frutal,
Agua

KEYWORDS

*Basin, Precipitation, Flow,
Fruit consumption, Water.*

Resumen

En el contexto de disponibilidad de agua, se evaluó y analizó el comportamiento dinámico de la agricultura frutal en el tiempo y si esta ha sido causa aparente de las disminuciones en las ofertas de agua a nivel de cauce, en la cuenca Hierro Viejo en Petorca y cuenca Quinquimo en La Ligua. Para conocer el comportamiento en tendencias de las precipitaciones y de los caudales medios mensuales se utilizó la prueba estadística de Mann Kendall. Además, se hizo una investigación del cambio de uso de suelo para comparar la evolución de superficie cultivada con paltos, a través de la técnica de clasificación supervisada de imágenes satelitales. Los resultados revelan que la superficie de paltos en la cuenca Hierro Viejo aumentó 6 veces desde el año 1986 al 2019. En la cuenca Quinquimo, el incremental de palto fue similar, pero a mayor escala, teniendo 9300 hectáreas el año 2019. En paralelo la prueba de Mann Kendall mostró un bajo número de tendencias significativas en la serie de datos de las precipitaciones, lo que define que las precipitaciones se mantuvieron durante los últimos 35 años. Por otro lado, los caudales medios mensuales muestran un importante número de tendencias negativas significativas evidenciando una caída en el periodo estival, hecho que coincide con un incremento de la superficie de paltos y por ende afectaría la producción de agua. Estos resultados coinciden con lo expresado por otros autores y referidos a ambas cuencas.

Abstract

In the context of water availability, the dynamic behavior of fruit agriculture over time was evaluated and analyzed and if this has been an apparent cause of the decreases in water supplies at the riverbed level, in the Hierro Viejo basin in Petorca and Quinquimo basin in La Ligua. The Mann Kendall statistical test was used to know the behavior in trends of rainfall and monthly mean flows. In addition, an investigation of the change in land use was carried out to compare the evolution of cultivated area with avocados, through the technique of supervised classification of satellite images.

The results reveal that the avocado area in the Hierro Viejo basin increased 6 times from 1986 to 2019. In the Quinquimo basin, the avocado increment was similar, but on a larger scale, with 9,300 hectares in 2019. In parallel, the The Mann Kendall test showed a low number of significant trends in the rainfall data series, defining that rainfall was sustained over the past 35 years. On the other hand, the monthly average flows show an important number of significant negative trends showing a fall in the summer period, a fact that coincides with an increase in the avocado surface and therefore would affect water production. These results coincide with what was expressed by other authors and referred to both basins.

1 Universidad de Talca. dsilva7793@gmail.com, paulinapalaciosgalaz@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para asegurar la vida y es el elemento vital para los ecosistemas, por lo que las presentes y futuras generaciones dependen de este importante recurso (FAO, 2017). El agua cubre el 70% de la superficie del planeta, donde solo un 2,5 % corresponde a agua dulce, es decir, a ríos, lagos y acuíferos, de los cuales solo el 0,62% es apto para consumo humano, agrícola e industrial (Escenarios Hídricos, 2018). Las cifras mencionadas revelan una gran incertidumbre, en lo respecta al cambio climático (Martínez y Patiño, 2012). A escala global se pronostica que las consecuencias del cambio climático en los recursos hídricos serán extensas, pero con distinto comportamiento de una región a otra, conforme a la latitud, la altitud y las condiciones orográficas. En general, en latitudes altas se espera un aumento de las precipitaciones y mayores escurrimientos, mientras que en latitudes medias y zonas subtropicales se prevé lo contrario, lo que provocaría un aumento en las condiciones de escasez y una mayor presión sobre los recursos hídricos (IPCC, 2008). Además, el consumo ha ido creciendo a un ritmo insostenible, en relación con la real disponibilidad del recurso, agravando el deterioro de las cuencas hidrográficas del mundo. Situación que se agudiza en América Latina y el Caribe, en el transcurso de los últimos 50 años, puesto que la superficie agrícola creció significativamente, pasando de 561 a 741 millones de hectáreas, con la mayor expansión en América del Sur, con un incremento de 441 a 607 millones de hectáreas, acentuando grandes problemas en esta parte del continente, como lo son la pérdida de la calidad del suelo y la disminución en la disponibilidad de agua (FAO, 2020). Debido a que, en las tres últimas décadas la extracción de agua en América Latina se ha duplicado, con un ritmo muy superior a la media mundial, en donde el sector agrícola tiene el mayor porcentaje en extracciones de agua, con un 70%, siguiéndole el consumo doméstico con un 20% y la industria con un 10% (FAO, 2020). Dicha realidad, ha provocado una sequía que afecta gravemente la parte central del país, espacio geográfico de concentración espacial del modelo agroexportador (Miranda, 2018). Principalmente en la Región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Petorca, puesto que ha sido uno de los lugares con mayor impacto producto de la sequía. Teniendo un déficit de un 50 % en el sistema de extracción de aguas potables (MOP, 2017). Es por esto que resulta indispensable evaluar y analizar el

comportamiento dinámico de la agricultura en el tiempo y si esta es causa aparente o no de las disminuciones en las ofertas de agua a nivel de cauce. Para ello la investigación se radica en la Región de Valparaíso, específicamente en las cuencas del río La Ligua y el río Petorca.

2. METODOLOGÍA

La investigación se basó en una recopilación de gran cantidad de información y material relacionado con el tema central de este trabajo. Se indagó sobre conceptos del área de las ciencias hidrológicas, lo cual se realizó a través de libros de hidrología, tesis, sitios web, revistas y publicaciones científicas. Además, se compiló información de los efectos del cambio de uso de suelo sobre el comportamiento de variables hidrológicas de una cuenca, entre las que se encuentran los caudales y precipitaciones. Junto con lo anterior, se presentan a continuación, la serie de procesos metodológicos para poder llevar a cabo respuestas del como ha sido el crecimiento de la superficie de paltos, comportamiento de las tendencias de las variables hidrológicas en estudio, y la relaciones que ha tenido el incremental de palto, caudales medios mensuales y precipitaciones medias areales.

2.1 Captura de la información fluviométrica y pluviométrica

A continuación, se muestra la fuente de los datos de caudales medios mensuales y precipitaciones de las estaciones, además se detalla la cantidad y distribución espacial de las estaciones pluviométricas y fluviométricas utilizadas en este estudio, tanto para la cuenca del Hierro Viejo como para la cuenca Quinquimo. En cuanto a la información necesaria para realizar este trabajo fue proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA) y se solicitaron los datos de caudales medios mensuales y de precipitación, obtenidos de estaciones fluviométricas y pluviométricas respectivamente, que en su mayoría tenían un periodo de registro mayor a 40 años. Para los datos de precipitación, se consideraron 13 estaciones pluviométricas, donde 6 se encontraban ubicadas en la cuenca del río Petorca, de las cuales 4 estaban dentro de la cuenca Hierro Viejo y 2 en la periferia. En cuanto a las 7 estaciones de la cuenca río La Ligua, todas se encontraban dentro de la cuenca Quinquimo. La razón de la selección de estas estaciones pluviométricas fue por la continuidad de

información y por la ubicación geográfica, considerando que estas estuviesen más próximas al área de estudio de cada cuenca, y específicamente la que correspondía a la cuenca que se configuraba aguas arriba de cada estación fluviométrica usada en el análisis de este estudio. En cuanto a las tendencias de caudales medios mensuales de la hoya hidrográfica del río La Ligua fue seleccionada la estación fluviométrica Quinquimo, la cual se encontraba en la zona costera de la cuenca, a pocos kilómetros de la desembocadura al mar. Por otro

lado, la estación correspondiente a la cuenca del río Petorca, la estación fluviométrica Hierro Viejo, se ubicaba en la mitad del trayecto que recorre el cauce del río Petorca. La elección de ésta última estación se justifica dado que la estación que se encontraba próxima a la desembocadura del río, presentaba discontinuidad en los registros de información en los últimos periodos. En la figura 1, se presenta la distribución de las estaciones fluviométricas y pluviométricas en las cuencas del Hierro Viejo y Quinquimo.

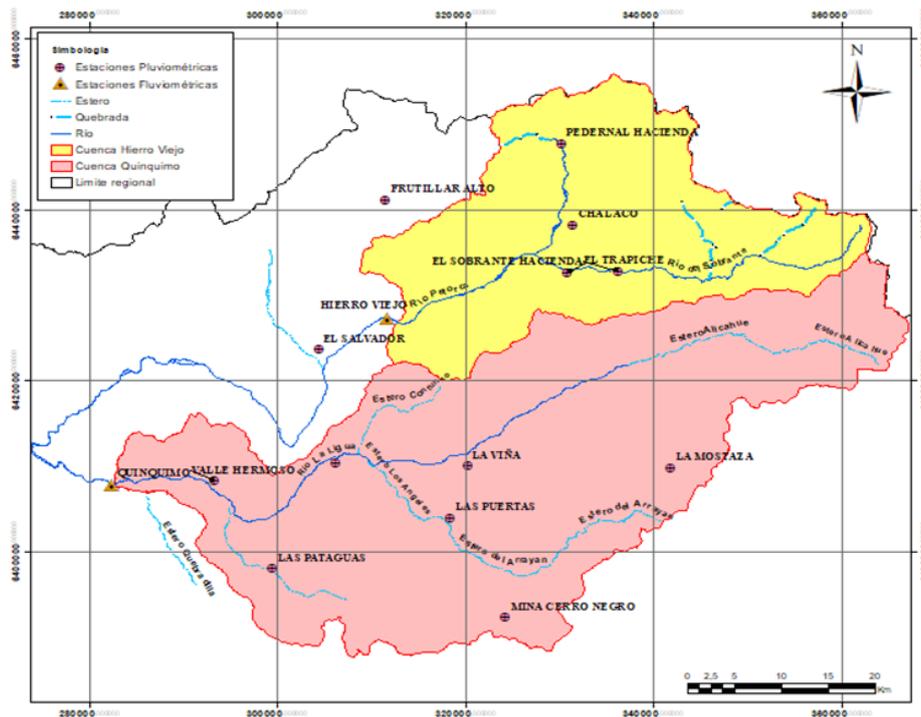


Figura 1. Mapa de ubicación de las estaciones fluviométricas y pluviométricas para el análisis de tendencia

2.2 Análisis del comportamiento del uso del suelo

Para estudiar el comportamiento del uso de suelo de las cuencas Hierro Viejo en Petorca, y Quinquimo en La Ligua, principalmente en lo referido a la evolución de la superficie de cultivos de palta en los últimos 30 años, se llevó a cabo un proceso de fotointerpretación de imágenes satelitales, el cual tuvo como finalidad obtener el incremento de la superficie de paltos dentro del período de años considerados en este estudio (1986-2018). Este proceso se debió realizar, ya que no existían registros o catastros que permitiesen revelar el comportamien-

to de incremento en la superficie agrícola durante las últimas tres décadas. La estimación de la superficie de paltos se hizo a través de clasificación supervisada, método que apunta a la extracción de clases de información de una imagen ráster multibanda, en este caso de 5 imágenes Landsat, las que son descritas en el cuadro 1. Estas imágenes fueron extraídas de Landsat Look Viewer, herramienta que pertenece al Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS (por sus siglas en inglés United States Geological Survey).

Cuadro 1. Lista de imágenes utilizadas en la Clasificación Supervisada

Cuencas hidrográficas	AÑO	SENSOR	cloud cover (%)	Fecha de imagen
Ríos La Ligua y Petorca	1986	Landsat 5-TM	2	30-12-1986
Ríos La Ligua y Petorca	1992	Landsat 5-TM	1	14-12-1992
Ríos La Ligua y Petorca	2000	Landsat 7-ETM +	2	21-12-2000
Ríos La Ligua y Petorca	2010	Landsat 7-ETM +	3	17-12-2010
Ríos La Ligua y Petorca	2019	Landsat 8-OLI	3	18-12-2019

La primera etapa de la clasificación consistió en delimitar la zona de estudio en la imagen, con el fin de enfocar la clasificación en el área de estudio. Por lo que, se realizó un recorte del ráster utilizando la herramienta *Extraction By Mask* que se encuentra en ArcGIS. Una vez realizada la extracción del área de estudio de la imagen ráster, se hizo una búsqueda de los sitios de entrenamiento o de muestreo. Puesto que no se contaba con información, ni recursos que permitieran generar sitios de entrenamiento con clases oficiales verificables en terreno, además se utilizó el geonavegador Google Earth Pro. Ya que, esta plataforma permite explorar y observar atributos de manera más detallada y de alta resolución, lo que facilita la distinción de objetos y tipos de coberturas con menor complejidad. En el geonavegador Google Earth Pro, se usó la herramienta que permite hacer un recorrido a través del tiempo en las imágenes, lo que ayudó a localizar los sitios de entrenamiento en función de la data de la imagen que se estaba procesando. Para cada imagen Landsat se generaron sitios o parcelas de entrenamiento en el año y mes correspondiente a la fecha de la imagen, de este modo se puede asegurar que la cobertura estuviese exenta de variaciones, en la imagen satelital y en el geonavegador, debido al transcurso del tiempo. Luego de haber generado las capas con los sitios de entrenamiento, se procedió a realizar la clasificación supervisada. Para esto, en ArcGIS, se utilizó la herramienta de clasificación de imágenes, cuyo acceso era en *Cuztomize* → *Toolbars* → *Image Classification*. Después de habilitada la herramienta para la clasificación supervisada, se agregó la capa de sitios de entrenamiento, para esta quedar sobre la imagen Landsat a clasificar. Los sitios de entrenamiento dentro de la herramienta de clasificación se editaron en *Training Sample Manager* (Administrador de parcelas de entrenamiento). Este es un mecanismo que pertenece al clasificador de ArcGIS el cual permite editar, valorar y categorizar las clases definidas presentes en el ráster. Este paso permitió señalar al software, con ayuda de las muestras de entrenamiento, los lugares

donde hay certeza que se encontraba la clase de interés en el terreno. Además, se realizó la clasificación con la herramienta *Iteractive Supervise Classification* (Clasificación Supervisada Interactiva), la cual proyecta como resultado la imagen clasificada como una capa ráster. Luego de obtener el ráster con las clases presentes en la imagen del área de estudio, esta se transformó a formato vectorial con la herramienta *Conversion Tools*, cuya ubicación era en *Arctoolbox* de Arcgis (*ArcToolbox* → *Conversion Tools* → *From Raster* → *Raster to Polygon*). El resultado de la clasificación en formato vectorial, permitió obtener los polígonos de cultivos de palto en la zona de estudio; obteniéndose la superficie presente en esa área, en el año correspondiente a la imagen satelital. Por último, para aumentar la certeza de que los resultados obtenidos en la clasificación de imágenes satelitales eran correctos, se llevó a cabo una verificación de los resultados. La verificación se aplicó a las 5 imágenes Landsat procesadas (1986, 1992, 2000, 2010 y 2019). A través del complemento del software Qgis llamado *post-procesamiento*, el cual posee una herramienta que tiene el nombre *precisión*. La herramienta utiliza el coeficiente de Kappa ($r.kappa$ en Qgis), para estimar la exactitud del procesamiento. $R.kappa$ tabula la matriz de error kappa del resultado de la clasificación, cruzando la capa ráster clasificada con una capa ráster de referencia, en base a puntos evaluados en terreno o de imágenes de alta resolución. En este trabajo, los puntos de la capa ráster de validación se obtuvieron de imágenes de alta resolución presentes en el geonavegador Google Earth.

2.3 Análisis de las tendencias fluviométricas y pluviométricas con Mann Kendall

La prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall, ha sido usada frecuentemente para calcular la significancia de tendencias en las series de tiempo de variables hidrometeorológicas. El principal argumento de la aplicación de esta prueba se basa en ser la indicada para distribuciones que no presentan normalidad estadística, como ocurre con frecuencia

en las series de datos hidrometeorológicos (Puertas et al. 2011). La aplicación de esta prueba no paramétrica en este estudio tiene como objetivo el estimar las tendencias temporales en la serie de datos de precipitación y caudales medios mensuales. Los datos de caudales medios mensuales y precipitaciones se dividieron en tres series de tiempo. Las series correspondientes para los datos de precipitación correspondieron a los años 1986-2000, 1986-2010 y 1986-2018, (asumiendo incrementales temporales de más menos 10 años), se aplicó para los datos de precipitaciones de ambas cuencas por separado. En el análisis de tendencias de los caudales medios mensuales de cada cuenca, se usaron las mismas series de datos, aunque para la última serie, el año de término fue el 2016 (1986-2016), lo que se justifica ya que para ambas estaciones fluviométricas solo existía registro continuo de datos hasta el año 2016. El test de Mann-kendall comprueba una posible hipótesis nula (H0), es decir, las

observaciones xi se ordenan de forma aleatoria en el tiempo o no existe tendencia en la serie de datos. Por el contrario, la hipótesis alternativa (H1) señala que existe una tendencia positiva o negativa en la serie de datos registrados. El análisis es realizado, como fue mencionado anteriormente en el caso de este estudio, en series de datos de caudales medios mensuales y precipitación, de manera que se obtuvo el estadístico Z y el valor-p, donde el primero señala la dirección de la tendencia, si esta es positiva o negativa, y el segundo muestra el nivel de significancia para un $\alpha=0.05$, con un nivel de confianza de un 95%. Según Muñoz (2008), la variable estadística Mann-kendall para una serie de tiempo, de datos $\{Z_k, k=1, 2, \dots, n\}$ se define de la siguiente manera: a) Se registran los valores de las variables de forma ordenada, es decir, desde x_1 hasta x_n (x_1, x_2, \dots, x_n). b) Se obtiene el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes (x_j-x_k), con ($j>k$), de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{Signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

c) Obtención del estadístico S de Mann Kendall, mediante la ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k)$$

Si S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia es creciente; cuando S es negativo se infiere que hay una tendencia decreciente. d) Con base a los indicadores se estima una varianza para la

estadística S de Mann Kendall, que considera el caso de los empates ($\text{signo } x_j - x_k = 0$) obtenidos en el paso 2, mediante la ecuación:

$$VAR = \frac{1}{8} * \left[n * (n - 1) * (2 * n + 5) - \sum_{q=1}^g t_q * (t_q - 1) * (2 * t_q + 5) \right]$$

e) Cálculo del estadístico Z_{MK} mediante:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{[VAR(S)]^{\frac{1}{2}}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{[VAR(S)]^{\frac{1}{2}}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

f) A partir del estadístico Z_{MK} , se evalúa la hipótesis de interés, que puede ser:

a) H_0 : No hay tendencia vs. H_1 : Hay tendencia decreciente

b) H_0 : No hay tendencia vs. H_1 : Hay tendencia creciente

Después de calcular el estadístico Z_{MK} , este se compara con el valor-p (0,05), lo que permite aceptar o rechazar la hipótesis nula. Se rechaza la H_0 si es que el valor arrojado por $Z_{MK} > \text{valor-p} = 0.05$.

2.4 Estimación de las precipitaciones areales medias.

Para poder realizar un análisis de la relación de precipitaciones con el comportamiento del caudal medio mensual de la estación pluviométrica de cada cuenca, fue necesario obtener la precipitación media areal. Debiendo definir la superficie de influencia de cada estación pluviométrica respecto a su ubicación respectivamente, lo cual se realizó a través del método de los Polígonos de Thiessen. Este método asigna una ponderación de representatividad en función de la superficie, donde a cada estación se le asigna una superficie, la cual es obtenida a través de

$$h_p = \frac{(\sum_{i=1}^n A_i * h_{pi})}{A_T}$$

donde

h_p Altura de la precipitación media

h_{pi} Altura de la precipitación registrada en la estación i

A_i Área de influencia de la estación i

A_T Área total de la cuenca

3. RESULTADOS

En este ítem se exponen los principales resultados de los valores de cobertura de palto obtenidos de la clasificación de imágenes Landsat, correspondientes a los años 1986, 1992, 2000, 2010 y 2019. Adicionalmente se expresan los resultados del estudio de tendencias realizado con Mann Kendall, para los datos de precipitaciones en los periodos 1986-2000, 1986-2010 y 1986-2018, y para los datos de caudales medios mensuales en los periodos 1986-2000, 1986-2010 y 1986-2016. Además, se presentan los resultados del cálculo de la precipitación media areal para cada subcuenca en estudio, donde se aplicó el método de Polígonos de Thiessen.

3.1 Presentación de resultados del comportamiento del uso de suelo.

En esta sección se muestran los resultados del comportamiento del incremental de cultivos de paltos de ambas cuencas en estudio. La figura 2 y 3 muestran de manera gráfica las superficies obtenidas de la fotointerpretación de las cinco imágenes Landsat foto-interpretadas. En cada grafico se exponen los valores en hectárea de paltos de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo, para los años 1986, 1992, 2000, 2010 y 2019 respectivamente.

3.2 Presentación de resultados de tendencias de la Prueba no Paramétrica de Mann Kendall

la representación de las estaciones en un plano y uniéndolas mediante una recta. Posteriormente a cada recta se les trazan sus mediatrices hasta que se interceptan entre sí. Con los límites del área de estudio y los que definen las mediatrices se obtiene la superficie de influencia de cada estación (Chow et al. 1994, Pizarro et al. 2003). La lluvia media o precipitación areal media, según Aparicio (2003), se calcula entonces como un promedio ponderado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente, expresándolo con la siguiente ecuación:

Como fue mencionado en el punto 2.3 de la metodología de este artículo, se realizó un análisis de tendencias con el test estadístico Mann-Kendall para los datos de de las estaciones pluviométricas y pluviométricas de las cuencas en estudio. A continuación, se muestran los resultados de las tendencias de los caudales medios mensuales y precipitaciones medias de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo para los tres periodos analizados.

3.2.1 Resultados de tendencias de las series de datos mensuales de precipitación de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo.

El cuadro 2 expone las tendencias de la prueba no paramétrica Mann Kendall, de la serie de datos mensuales de las 6 estaciones pluviométricas seleccionadas en la cuenca Hierro Viejo (Petorca), para los periodos (1986-2000), (2001-2010) y (2011-2018). En cuanto a los resultados de las tendencias de los datos de precipitaciones de las 7 estaciones pluviométricas de la cuenca de la estación pluviométrica Quinquimo, (La Ligua), el cuadro 3 muestra el resumen de las tendencias positivas, negativas, positivas significativas y negativas significativas de la serie de datos de precipitaciones, para los periodos (1986-2000), (2001-2010) y (2011-2018).

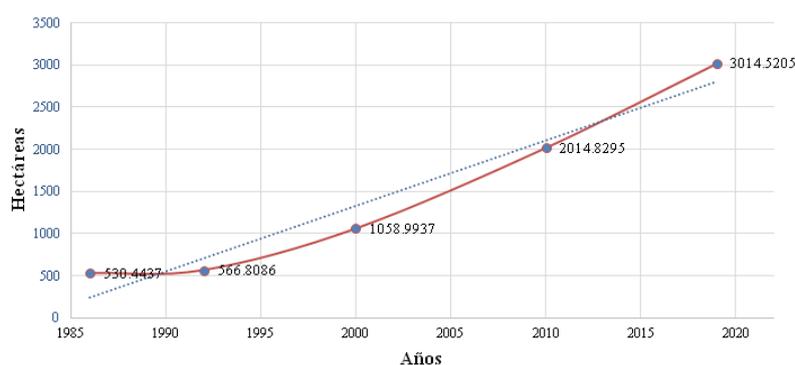


Figura 2. Curva de comportamiento del incremental de superficie cultivada de patos en la cuenca Huevo Viejo, (1986-2019)

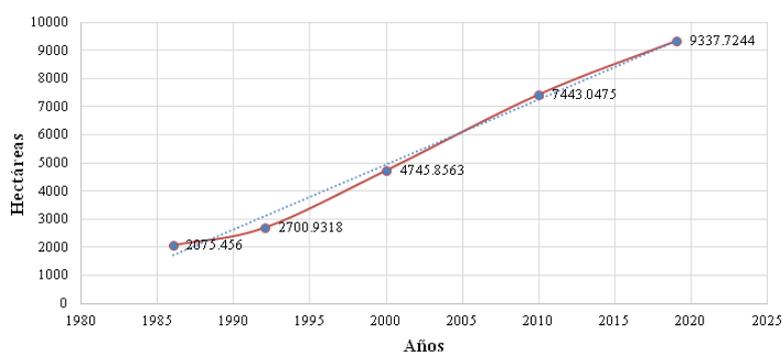


Figura 3. Curva de comportamiento del incremental de superficie cultivada de patos en la cuenca Quinquimo, (1986-2019)

Cuadro 2. Resumen de tendencias de precipitaciones para los tres periodos analizados en la cuenca Huevo Viejo

Periodo	Total estaciones por mes	Tendencias positivas	Tendencias negativas	Tendencias positivas significativas	Tendencias negativas significativas	Sin tendencia
1986-2000	6	31 (43.1)	33 (45.8)	1 (1.4)	2 (2.8)	5 (6.9)
1986-2010	6	31 (43.1)	34 (47.2)	0 (0)	0 (0)	7 (9.7)
1986-2018	6	23 (31.9)	49 (68.1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

(): Valor entre paréntesis señala el % de las series que presentan tendencias positivas y negativas.

Cuadro 3. Resumen de tendencias de precipitaciones para los tres periodos analizados en la cuenca Quinquimo

Periodo	Total estaciones por mes	Tendencias positivas	Tendencias negativas	Tendencias positivas significativas	Tendencias negativas significativas	Sin tendencia
1986-2000	7	39 (46.4)	37 (44)	1 (1.2)	0 (0)	7 (8.3)
1986-2010	7	42 (50)	37 (44)	1 (1.2)	0 (0)	4 (4.8)
1986-2018	7	29 (34.5)	51 (60.7)	0 (0)	2 (2.4)	2 (2.4)

(): Valor entre paréntesis señala el % de las series que presentan tendencias positivas y negativas

3.2.2 Resultados de tendencias de las series de datos de caudales medios mensuales de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo

El cuadro 4 presenta el resumen de los resultados de las tendencias de la prueba no paramétrica de Mann Kendall, aplicada la serie de datos de caudales medios mensuales de la estación fluviométrica Hierro Viejo, en los periodos de años (1986-2000), (1986-2010) y (1986-2016). En los caudales medios mensuales, el análisis de las tendencias fue distinto al

de las precipitaciones, ya que en este caso solo se evalúa una estación por cuenca. Por lo tanto, en cada cuenca en estudio se trabajó con 12 tendencias, una por cada mes. En cuanto al comportamiento de las tendencias de la serie de datos de caudales medios mensuales para la cuenca Quinquimo, el cuadro 5 presenta el resumen de los resultados de las tendencias de la prueba no paramétrica de Mann Kendall, para los periodos de años (1986-2000), (1986-2010) y (1986-2016).

Cuadro 4. Resumen de tendencias de los caudales medios mensuales para los tres periodos analizados en la cuenca Hierro Viejo, en Petorca.

Periodo	Total estaciones por mes	Tendencias positivas	Tendencias negativas	Tendencias positivas significativas	Tendencias negativas significativas	Sin tendencia
1986-2000	1	10 (83.3)	1 (8.3)	0 (0)	0 (0)	1 (8.3)
1986-2010	1	8 (66.7)	3 (25)	0 (0)	0 (0)	1 (8.3)
1986-2018	1	0 (0)	7 (58.3)	0 (0)	5 (41.7)	0 (0)

(): Valor entre paréntesis señala el % de las series que presentan tendencias positivas y negativas.

Cuadro 5: Resumen de tendencias de los caudales medios mensuales para los tres periodos analizados en la cuenca Quinquimo, en La Ligua.

Periodo	Total estaciones por mes	Tendencias positivas	Tendencias negativas	Tendencias positivas significativas	Tendencias negativas significativas	Sin tendencia
1986-2000	1	3 (25)	5 (41,7)	1 (8,3)	0 (0)	3 (25)
1986-2010	1	1 (8,3)	9 (75)	0 (0)	0 (0)	2 (16,7)
1986-2018	1	1 (8,3)	3 (25)	0 (0)	8 (66,7)	0 (0)

(): Valor entre paréntesis señala el % de las series que presentan tendencias positivas y negativas.

3.3 Presentación de resultados de la relación existente entre la precipitación media areal, los caudales medios mensuales y el incremento de la superficie cultivada de paltos.

En este ítem se presentan los resultados del cálculo de las precipitaciones medias areales de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo, para lo cual se aplicó el método de los Polígonos de Thiessen, mencionado en la metodología. Los resultados se exponen mediante gráficos que muestran el comportamiento de las precipitaciones medias areales, los caudales medios mensuales y el incremental de palto que se ha presentado durante el año 1986 hasta el 2019.

3.3.1 Presentación de la relación de las precipitaciones medias areales, los caudales medios mensuales y el incremento de la superficie cultivada de paltos en la cuenca Hierro Viejo.

Las figuras 4, 5 y 6 que se presentan a continuación, grafican el comportamiento de las precipitaciones medias areales con los caudales medios mensuales de la cuenca Hierro Viejo en Petorca. Además, muestran el incremento de la superficie cultivada con paltos durante los años 1986 al 2019.

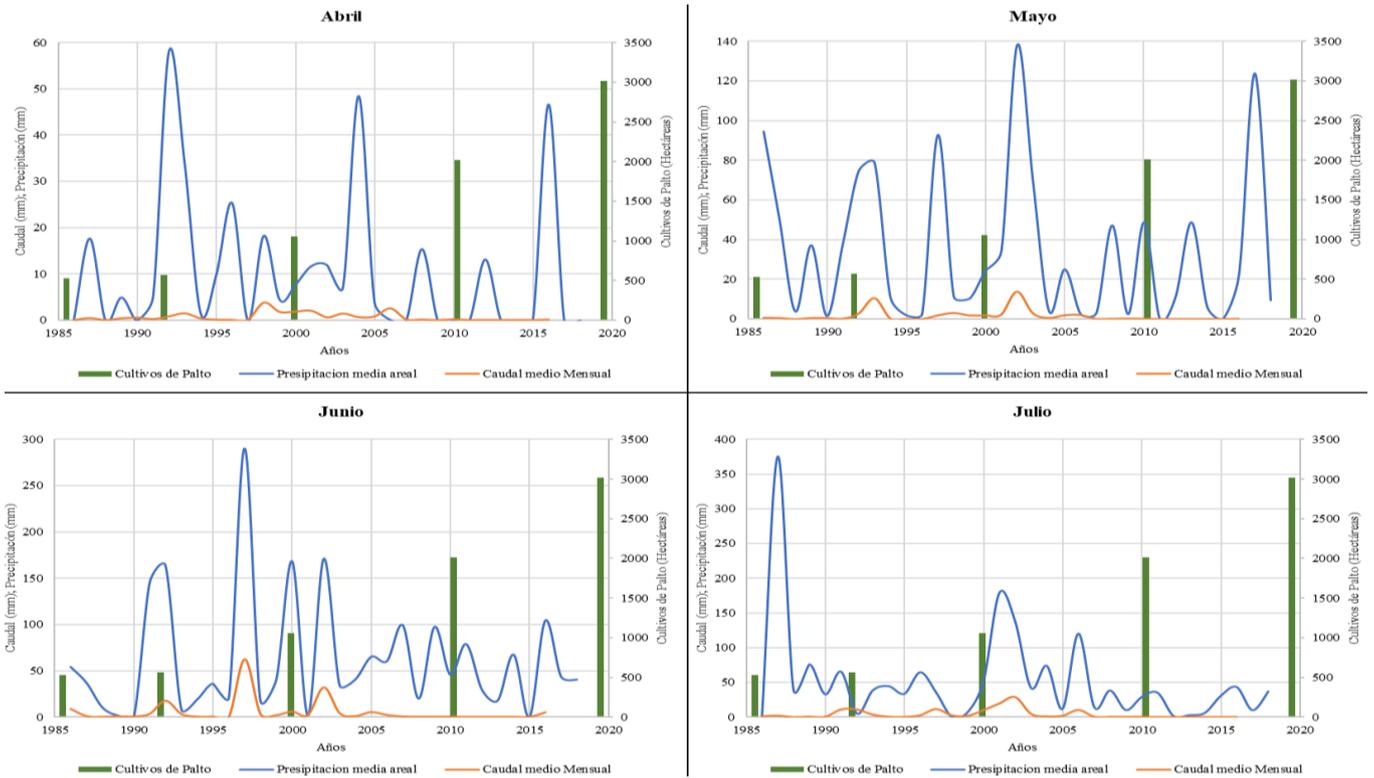


Figura 4. Gráficos de comparación de precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremento de palto en el periodo 1986-2019, para los meses de abril a julio, en la cuenca Hierro Viejo.

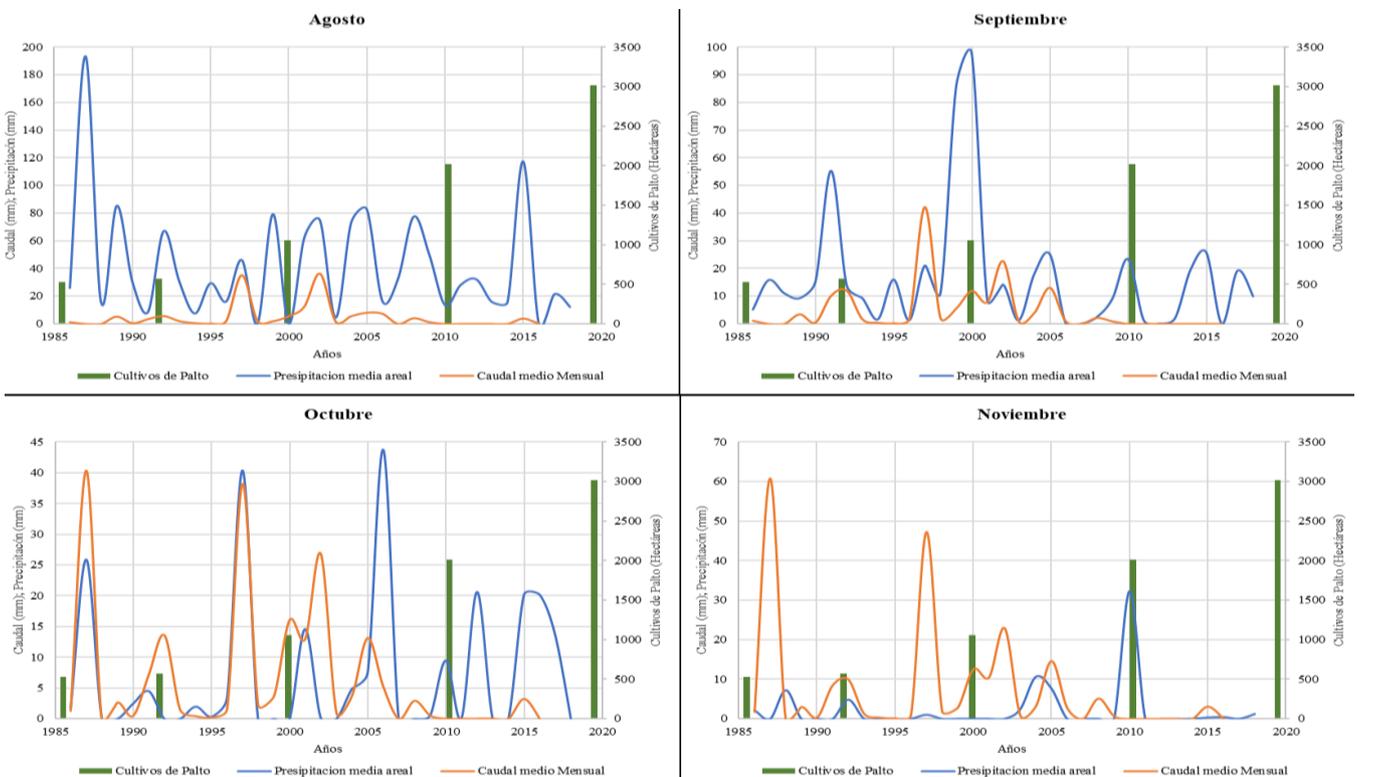


Figura 5. Gráficos de comparación de precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremento de palto en el periodo 1986-2019, para los meses de agosto a noviembre, en la cuenca Hierro Viejo.

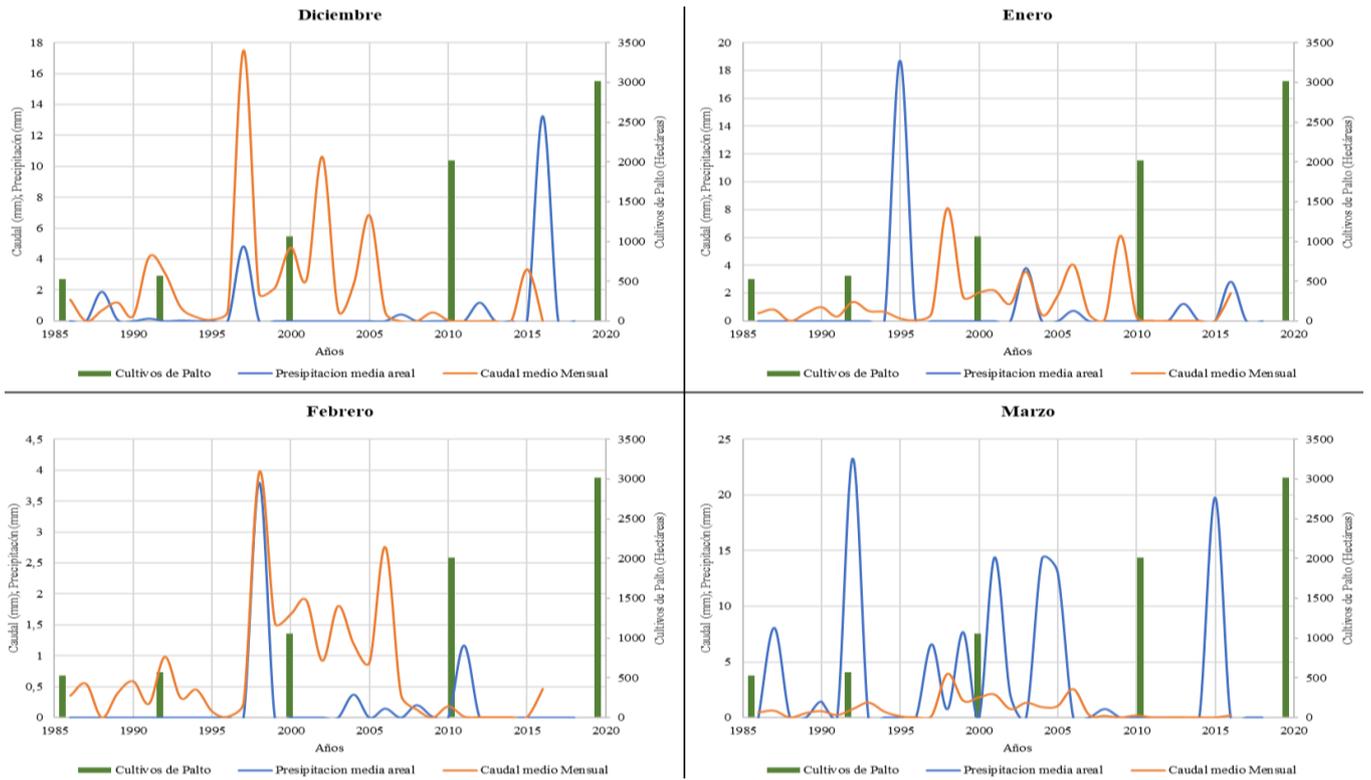


Figura 6. Gráficos de comparación de precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremento de palto en el periodo 1986-2019, para los meses de diciembre a marzo, en la cuenca Huevo Viejo.

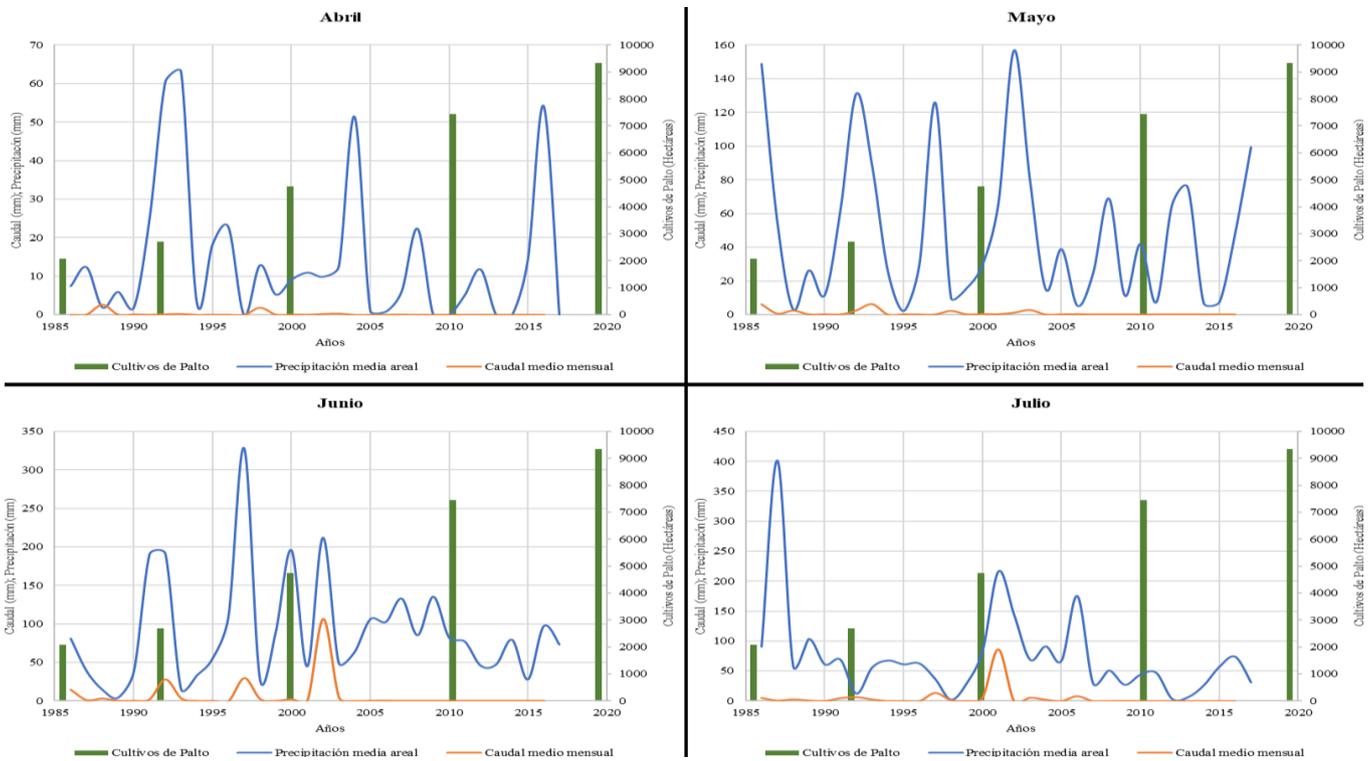


Figura 7. Gráficos de comparación de precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremento de palto en el periodo 1986-2019, para los meses de abril a julio, en la cuenca Quinimo.

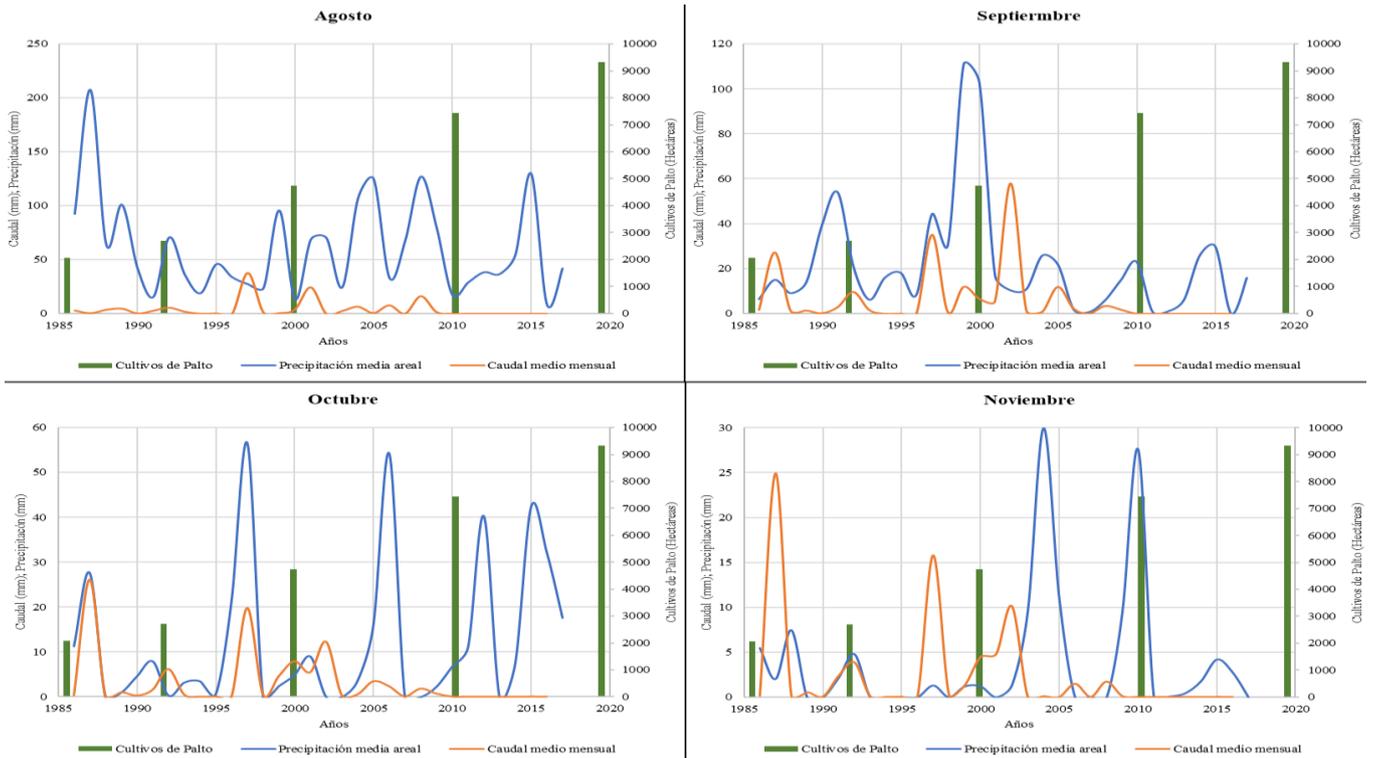


Figura 8. Gráficos de comparación de precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremento de paltos en el periodo 1986-2019, para los meses de agosto a noviembre, en la cuenca Quinquimo.

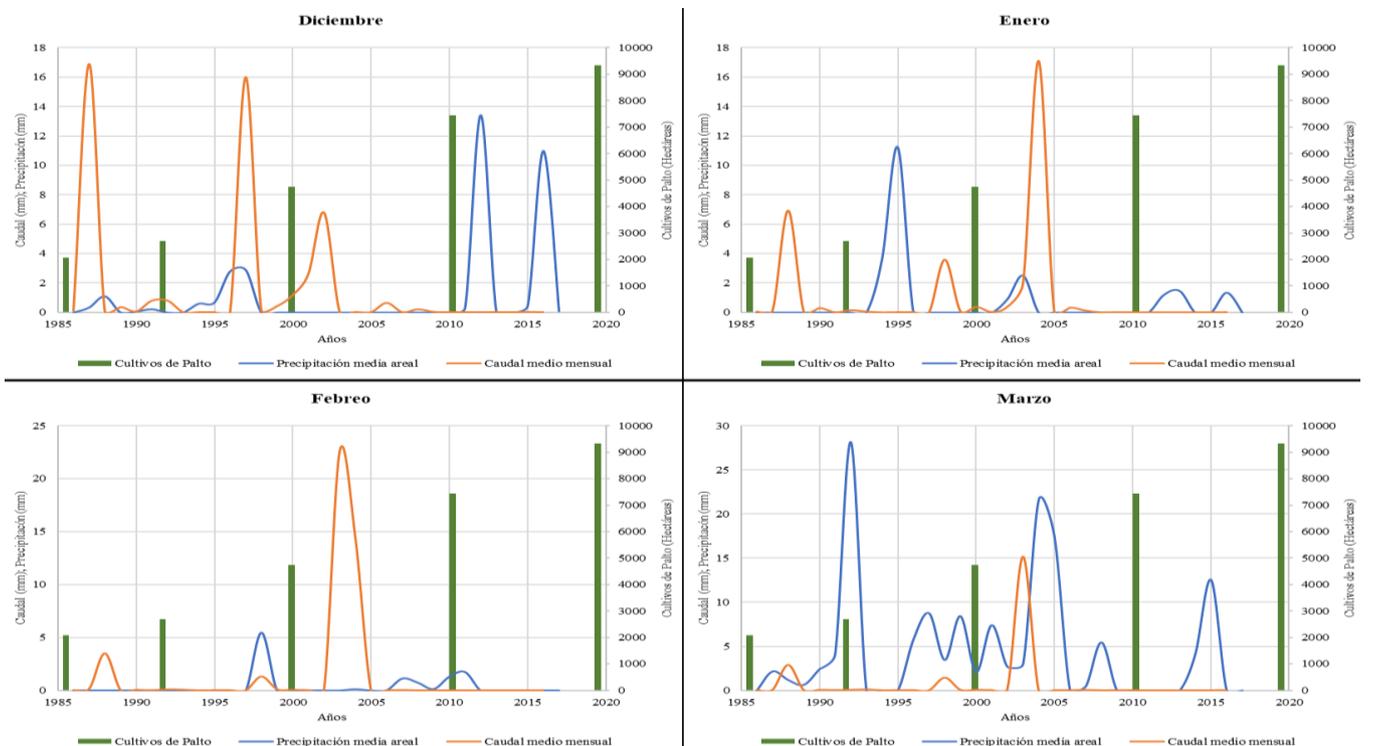


Figura 9. Gráficos de comparación de precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremento de paltos en el periodo 1986-2019, para los meses de diciembre a marzo, en la cuenca Quinquimo.

3.3.2 Presentación de la relación de las precipitaciones medias areales, los caudales medios mensuales y el incremento de la superficie cultivada de paltos en la cuenca Quinquimo.

Así mismo, las figuras 7, 8 y 9, exponen en seguida grafican el comportamiento de las precipitaciones medias areales, con los caudales medios mensuales de la cuenca Quinquimo en La Ligua. Además, muestran el incremento de la superficie cultivada con paltos durante el periodo 1986-2019.

4. DISCUSIÓN

En este capítulo se desglosa un análisis y discusión de los resultados presentados en el anterior ítem. Se discute sobre el comportamiento del incremental de paltos tanto en la cuenca Hierro Viejo como en la cuenca Quinquimo. También, se interpretan y discuten los resultados de las tendencias obtenidas con el test no paramétrico de Mann Kendall para los datos de caudales medios mensuales y precipitación de ambas cuencas respectivas, y por último se discuten los resultados representados de manera gráficas de la relación de las precipitaciones medias areales, caudales medios mensuales e incremental de paltos para las cuencas en estudio.

4.1 Discusión de resultados del comportamiento del uso de suelo.

Según los resultados del análisis de cambio de uso de suelo a través de la clasificación de imágenes, en el año 1986 en la cuenca estación Hierro Viejo se encontraban en desarrollo hasta esa fecha 530, 4 hectáreas de palto. Considerando el término del primer periodo de análisis de tendencias, en el año 2000 la cantidad de superficie de paltos cultivada se duplicó, alcanzando aproximadamente las 1060 hectáreas (Figura 2). Los datos señalan que, en el 2010, la superficie de paltos siguió aumentando en casi dos veces la cifra del año 2000, superando las 2000 hectáreas plantadas en la cuenca Hierro Viejo. En cuanto al 2019, se advirtió que la superficie de paltos continuó en crecimiento, acumulando 3014 hectáreas, multiplicando en aproximadamente seis veces la cantidad registrada en el año 1986. En relación con la cuenca Quinquimo, cuenca del río La Ligua, la superficie plantada de paltos tuvo un comportamiento análogo al crecimiento ocurrido en la cuenca del río Hierro Viejo y durante todo el horizonte temporal que involucra esta investigación (1986-2019), pero a mayor escala, ya que el área de estudio de esta cuenca es de mayor superficie. Como se observa en la figura 3, en el año 1986, la superficie con cubierta de paltos era de 2075,6 hectáreas. Catorce años después, en el año 2000, la superficie mostró un aumento en más del doble del área cultivada en el año 1986. En el año 2010, 10 años después, la cobertura de paltos se incrementaría en

más del 50% en relación con lo acumulado en el año 2000. En el año 2019, la cifra de hectáreas de palto siguió en alza, doblando la cifra estimada del año 2000 y superando las 9000 hectáreas de paltos. Al considerar la cifra acumulada en el año 1986, la cobertura de paltos se cuadruplicó durante los 30 años.

4.2 Discusión de resultado de tendencia de la Prueba no Paramétrica de Mann Kendall

En cuanto a los resultados de las tendencias de los caudales medios mensuales y precipitaciones medias, en los siguientes subtem se discute sobre el comportamiento de las tendencias arrojadas por Man Kendall.

4.2.1 Análisis de tendencias de las series de datos mensuales de precipitación de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo.

El cuadro 2, es el resumen de las tendencias de la prueba no paramétrica Mann Kendall, de la serie de datos mensuales de las 6 estaciones pluviométricas seleccionadas en la cuenca Hierro Viejo (Petorca), para los periodos (1986-2000), (2001-2010) y (2011-2018). En el primer periodo (1986-2000), se puede observar que hubo tendencias significativas positivas y significativas, pero de poca importancia dado su bajo valor porcentual. En cuanto al segundo y tercer periodo de análisis (1986-2010 y 1986-2018), no se presentaron tendencias negativas significativas, como tampoco positivas significativas, lo cual indicaría que, durante el último periodo de 30 años, las precipitaciones se han mantenido relativamente estables en el tiempo en la cuenca de la estación fluviométrica Hierro Viejo. En cuanto a los resultados de las tendencias de los datos de precipitaciones de las 7 estaciones pluviométricas de la cuenca de la estación fluviométrica Quinquimo, (La Ligua), el cuadro 3 muestra a continuación el resumen de las tendencias positivas, negativas, positivas significativas y negativas significativas de la serie de datos de precipitaciones, para los periodos (1986-2000), (2001-2010) y (2011-2018). Por lo que se puede apreciar en el cuadro 3, en el primer y segundo periodo de análisis de tendencias (1986-2000 y 1986-2010), se presentaron tendencias positivas significativas en las series de datos de precipitaciones mensuales, pero en un número insignificante para el total analizado (1,2%). En el periodo 1986-2018, hubo 2 tendencias negativas significativas en la serie de datos mensuales de precipitaciones, manifestando nuevamente una casi nula representatividad porcentual. Por lo tanto, en vista de estos resultados, se infiere que las precipitaciones de la cuenca de la estación fluviométrica Quinquimo, no han aumentado y tampoco disminuido, sino que se han mantenido durante los últimos 30 años y en los diversos periodos analizados.

4.2.2 Análisis de tendencias de las series de datos de caudales medios mensuales de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo.

Como se observa en el cuadro 4, en los periodos 1986-2000 y 1986-2010 no se muestran tendencias positivas ni negativas significativas, por lo que durante ese tiempo los caudales en la cuenca Hierro Viejo se mantuvieron relativamente estables. Sin embargo, el último periodo que considera todo el lapso, (1986-2016), muestra tendencias negativas significativas, las que representan el 41,7% de las tendencias, las que por su importante valor porcentual indicarían que los caudales medios mensuales en el río Petorca han disminuido de manera considerable. Al detallar en qué mes se concentraron las tendencias negativas significativas, estas se ubican a la salida del periodo estival, (marzo y abril), es decir cuando las demandas han presionado al sistema al máximo y podría reflejar que ha existido un incremento de estas. Esto también se verifica en el otoño e inicios del invierno (mayo, junio y julio), es decir cuando las reservas de agua se encuentran muy bajas y aún no caen las nuevas precipitaciones invernales. Esto último podría deberse a la mega sequía que afectó al país y a la zona en la década de 2010, lo que habría definido una menor expresión de los caudales en el río. Sin embargo, llama la atención que los caudales en el periodo de deshielo no presentaron tendencias significativas a la baja, lo que definiría una situación de reservas de agua o de aportaciones nivales en el marco de lo normal. En cuanto al comportamiento de las tendencias de la serie de datos de caudales medios mensuales para la cuenca Quinquimo, el cuadro 5 presenta el resumen de los resultados de las tendencias de la prueba no paramétrica de Mann Kendall, para los periodos de años (1986-2000), (1986-2010) y (1986-2016). Al observar el cuadro 5, se pudo ver que, en el primer periodo de análisis, hubo una sola tendencia positiva y significativa, lo que no indicaría que hubo un aumento en los caudales medios mensuales dentro de este periodo. En el segundo periodo (1986-2010), se muestra que no se presentaron tendencias positivas ni negativas significativas. Sin embargo, en el periodo total, 2/3 de las tendencias fueron negativas y significativas, lo que permite inferir que durante este último tiempo los caudales medios mensuales en río La Ligua han decrecido de manera importante. Al analizar el comportamiento a nivel mensual, las tendencias negativas significativas se distribuyen en casi todos los meses del año, excluyendo los meses de abril, agosto, octubre y diciembre. Este elemento

podría estar señalando que el incremental de paltos podría estar afectando de manera significativa la producción de caudales medios de la cuenca en los meses estivales de noviembre, enero, febrero y marzo, periodo de máximo consumo de estos frutales.

4.3 Análisis de la relación existente entre la precipitación media areal, los caudales medios mensuales y el incremento de la superficie cultivada de paltos.

En este ítem son discutidos los resultados del cálculo de las precipitaciones medias areales de las cuencas Hierro Viejo y Quinquimo, para lo cual se aplicó el método de los Polígonos de Thiessen, mencionado en la metodología. Además, se analiza mediante gráficos el comportamiento de las precipitaciones medias areales, los caudales medios mensuales y el incremental de palto que se ha presentado durante el año 1986 hasta el 2019.

4.3.1 Análisis relacional de las precipitaciones medias areales, los caudales medios mensuales y el incremento de la superficie cultivada de paltos en la cuenca Hierro Viejo.

Como se observa en la figura 4, figura 5 y figura 6, a nivel general las precipitaciones muestran una tendencia visual a la baja, aunque ya se señaló que no hay significancia estadística. Sin embargo, si se consideran sólo los últimos 10 años, los meses de junio y julio muestran una disminución acentuada, como producto de la mega sequía. Por otra parte, los caudales medios mensuales manifiestan una disminución sostenida de sus montos en los últimos 10 años, siendo los meses invernales donde se encontraron más bajas significativas en el periodo total de análisis. Lo anterior, podría ser un reflejo de los efectos de la mega sequía que afecta a Chile (Boisier et al, 2015). En cuanto a los caudales medios estivales, estos denotan un pequeño incremento visual en algunos meses, aunque marzo y abril denotan caídas significativas y esto podría señalar una influencia negativa de un excesivo consumo de agua por parte de los frutales. Sin embargo, esto no es determinístico, en base a la información que se cuenta.

Bajo este marco, se podría señalar que el incremento de los cultivos de paltos durante el último periodo no incidiría de manera significativa en la baja de los caudales en el río Petorca, puesto que en los meses estivales, que es donde los cultivos de paltos requieren de un mayor consumo, no hay una constante significativa en la caída de los caudales ,

Sin embargo, lo anterior no es determinante ya que los meses que mostraron una importante caída en el caudal (marzo, abril y mayo), son meses estivales o de transición y cuya disminución puede deberse al incremento en las plantaciones de palto.

4.3.2 Análisis relacional de las precipitaciones medias areales, los caudales medios mensuales y el incremento de la superficie cultivada de paltos en la cuenca Quinquimo.

En la figura 7, figura 8 y figura 9 puede observar que las precipitaciones no sufrieron grandes cambios durante todo el periodo que considera el estudio, mostrando escasas tendencias significativas tanto positivas como negativas. Sin embargo, los caudales medios mensuales muestran lo contrario, dado que se evidenció un decremento importante en la mayoría de los meses, pero de manera más pronunciada en los meses de la temporada estival. Esto podría relacionarse de manera directa con el aumento de la demanda hídrica en este periodo, por el comienzo del lapso de máximo riego de este cultivo presente en la zona. Por ende, el aumento de las plantaciones de paltos tendría incidencia importante en el decremento significativo de los caudales medios mensuales de la temporada estival y sobre todo en la última década, que es la que aporta la diferenciación según Mann-Kendall.

Así mismo, en el estudio realizado por Duran-Llacer et al. (2020), se concluyó en la misma dirección, afirmando que de la evaluación de los caudales subterráneos determinó que había tendencias decrecientes significativas, la cual fue mayor en los caudales subterráneos de La Ligua, señalándose, además, que la disminución de las precipitaciones no fue significativa. Es por lo anterior, que el aumento de la alta demanda de agua, asociados a la demanda agrícola debido a los aumentos en el área de cultivo de paltos y el riego en la temporada seca, confirmaría que el agotamiento de las aguas superficiales y subterráneas estaría mayoritariamente influenciado por factores antropogénicos.

Sin embargo, sin restarle importancia, el fenómeno de la sequía también tendría un papel importante en la baja de los caudales, puesto que durante la temporada de invierno los cultivos no tienen mayores exigencias frente a las demandas de agua, por lo que la baja de los caudales en esa temporada sería más atribuible a factores climáticos, aunque la prueba Mann-Kendall no encontró diferencias significativas de caída de las lluvias en el tiempo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En función de los resultados alcanzados y la discusión realizada, es posible plantear las siguientes conclusiones y recomendaciones:

5.1 Conclusiones

- a. En las cuencas Hierro Viejo en Petorca y Quinquimo en La Ligua, la superficie de paltos ha mostrado un crecimiento importante los últimos 30 años que ha multiplicado por 6 y por 4 respectivamente, las superficies existentes en el año 1986.
- b. Según los resultados arrojados por la prueba no paramétrica de Mann Kendall, se advierte que las precipitaciones en la cuenca Hierro Viejo y Quinquimo, mostraron un escaso número de tendencias significativas, tanto positivas como negativas, lo que determinaría que estas no han sufrido grandes variaciones en los periodos estudiados. Por ende, en el periodo total no ha habido grandes cambios en el monto de precipitaciones a nivel mensual.
- c. Por otra parte, los caudales medios mensuales en la cuenca Hierro Viejo no manifiestan una disminución sostenida y significativa de sus montos en el periodo total en estudio y para los meses estivales, que es donde se produce el gran consumo por parte de los paltos. Sin embargo, marzo y abril denotan caídas significativas y esto podría señalar una influencia negativa de un excesivo consumo de agua por parte de los frutales, aunque no consigue ser determinístico.
- d. En relación a la cuenca Quinquimo, los caudales medios mensuales muestran un decremento significativo según Mann-Kendall, en la mayoría de los meses, pero de manera más pronunciada en los meses de la temporada estival. Esto podría relacionarse de manera directa con el aumento de la demanda hídrica en este periodo, por el comienzo del lapso de máximo riego del cultivo de paltos. De ello se concluye que el aumento de las plantaciones de paltos tendría incidencia importante en el decremento significativo de los caudales medios mensuales en el estío.

5.2 Recomendaciones

- a. Debido a la gran variabilidad de los datos de caudales medios mensuales y de precipitación, se recomienda extender el horizonte de tiempo de este estudio, de manera de comprender desde

- un periodo más inicial el comportamiento de las variables en cuestión de este estudio.
- b. Se recomienda ampliar este estudio utilizando otras variables como los caudales máximos y mínimos mensuales, las temperaturas u otras, que pudieran dar cuenta de cambios en los patrones de los regímenes hidrológicos de una mejor forma.
- c. Se recomienda realizar un estudio de estas mismas características, pero a nivel más detallado, en el sentido de no solo involucras un tipo de cultivo, sino que también considerar la totalidad de los cultivos agrícolas que requieren de demanda hídrica importante en la zona.
- d. Finalmente, se sugiere incentivar y desarrollar este tipo de investigaciones referidas a la relación entre las actividades humanas y la disponibilidad de agua, dado que esta última no es un recurso en abundancia, que sigue caminos de deterioro a medida que avanza el tiempo y es fundamental detener ese proceso, potenciando un mayor y mejor conocimiento sobre los ecosistemas del país, para usarlo en la aplicación de adecuadas políticas públicas.

REFERENCIAS

- Aparicio, F. 2003. Fundamentos de hidrología de superficie. México. Editorial Limusa, S.A. 303.
- Boisier, J.; Rondanelli, R.; Garreaud, R.; Muñoz, F. 2015. Contribuciones antropogénicas y naturales a la disminución de las precipitaciones del Pacífico Sudeste y la reciente mega sequía en el centro de Chile. Chile. Consultado 25 nov. 2020. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015GL067265>
- Chow, V.T; Maidment, D.; Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial MacGraw Hill. 80 p. Consultado 5 jul. 2020. Disponible en: https://kupdf.net/queue/hidrologia-aplicada-ven-te-chow_5afa99c5e2b6f5ef5f16c622_pdf?queue_id=1&x=1593931074&z=MjE2LjE1NS45MS4xNTk=
- Duran-Llacer, I.; Munizaga, J.; Arumí, J.; Ruybal, C.; Aguayo, M.; Sáez-Carrillo, K.; Arriagada, L.; Rojas, O. 2020. Lessons to Be Learned: Groundwater Depletion in Chile's Ligua and Petorca Watersheds through an Interdisciplinary Approach. Chile. Consultado 2 dic. 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2446/htm>
- Escenarios Hídricos 2030. 2018. Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile. Fundación Chile. (en línea). Chile. Consultado 24 oct. 2019. Disponible en <https://escenarioshidricos.cl/publicacion/radiografia-del-agua-brecha-y-riesgo-hidrico-en-chile/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para Alimentos y la Agricultura). 2017. Escasez de agua: Uno de los grandes retos de nuestro tiempo. Consultado el 24 oct. 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/880888/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para Alimentos y la Agricultura). 2020. Conservación de suelos y agua en América Latina y el Caribe. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Consultado 5 oct. 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2008. El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico VI de IPCC. Consultado 27 Jun. 2019. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>
- Martínez, P.; Patiño, C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. México. Consultado 25 oct. 2019. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001
- Miranda, F. 2018. Erosión de Suelos y Crisis Hídrica: Las sombras del modelo agroexportador del Palto. Fundación Terram. Santiago. Chile. Consultado 6 nov. 2019. Disponible en: https://www.terram.cl/descargar/naturaleza/agua/app_-_analisis_de_politicas_publicas/APP-70-Erosion-de-suelos-y-crisis-hidrica-las-sombras-del-modelo-agroexportador-de-palto.pdf

- MOP (Ministerio de Obras Públicas, Chile). 2017. Informe de condiciones hidrometeorológicas provincias de Quillota, Marga Marga, Petorca, y las comunas de Llay Llay, Con Con y San Antonio V Región de Valparaíso. Chile. Consultado 29 oct. 2019. Disponible en: <http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Documents/Decreto-4-V.pdf>
- Muñoz, C.2008. Análisis de la Variabilidad en series Hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura: cuenca del Río Mundo. Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena. Pag 146. Consultado el 20 jun 2020. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/60416059.pdf>
- Pizarro, R.; Ramírez, C.; Flores, J. 2003. Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. Depto. Gestión Forestal y Ambiental. Universidad de Talca. Talca. Chile. 2p. Consultado el 17 jul. 2020. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/bosque/v24n3/Art03.pdf>
- Puertas, O.; Carvajal Y.; Quintero, M. 2011. Estudio de Tendencias de la Precipitación Mensual en la Cuenca Alta-media del Río Cauca, Colombia. Edición dyna, vol 78 (169). Pag 112-120. Consultado 21 jun 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262737678_Estudio_de_tendencias_de_la_precipitacion_mensual_en_la_cuenca_alta-media_del_rio_Cauca_Colombia

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license