

CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA ESPACIAL DE HUMEDALES EN LA CABECERA DE CUENCA CACHI-APACHETA, REGIÓN AYACUCHO, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES DE RADAR SENTINEL 1A

Wilmer Moncada Sosa, Alex M. Pereda Medina, Manuel Lagos Barzola

Unidad de Investigación e Innovación de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Programa de Investigación de Física - Área de Investigación de Biofísica

E-mail: wilmer.moncada@unsch.edu.pe

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo caracterizar la dinámica espacial de humedales en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, mediante el uso de imágenes de radar Sentinel 1A y 1B. Para caracterizar la dinámica espacial de la humedad se utilizó el índice delta que consiste en relacionar la diferencia de las bandas VV y VH con respecto a la banda VH, cuyo cálculo en cada imagen de radar procesada genera píxeles con información de presencia de humedad, permitiendo que el índice delta sea un buen indicador de la humedad. Se logró caracterizar la zona de estudio contabilizando la cantidad de píxeles con valores entre 0,36 y 0,52 demostrándose que este rango de valores contiene información de la presencia de humedad distribuida de manera superficial. Se determinó que el valor medio del área con distribución espacial de humedad en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta es de 2016.5 Ha, durante el año 2017, con anomalías positivas en los meses de febrero (14.2%), mayo (14.4%), julio (15.8%), agosto (15.6), setiembre (14.2%) y noviembre (16.1%) con presencia de humedad por encima del valor medio y anomalías negativas en los meses de enero (13.5%), marzo (13.5%), abril (13.8%), junio (13.9%), octubre (12.6%) y diciembre (11%), durante el periodo 2017.

Palabras clave: SAR. Índice delta. Sentinel 1. Humedales.

CHARACTERIZATION OF THE SPACE DYNAMICS OF WETLANDS IN THE CACHI-APACHETA BASIN HEADQUARTERS, AYACUCHO REGION, USING RADAR SENTINEL-1A IMAGES

ABSTRACT

The objective of this research project is to characterize the spatial dynamics of wetlands in the headwaters of the Cachi-Apacheta basin, Ayacucho Region, by using Sentinel 1A and 1B radar images. To characterize the spatial dynamics of the humidity, the delta index was used, which consists in relating the difference of the VV and VH bands with respect to the VH band, whose calculation in each processed radar image generates pixels with information on the presence of humidity, allowing that the delta index is a good indicator of humidity. The study area was characterized by counting the number of pixels with values between 0.36 and 0.52, demonstrating that this range of values contains information on the presence of moisture distributed in a superficial manner. It was determined that the average value of the area with spatial distribution of humidity in the headwaters of the Cachi-Apacheta basin is 2016.5 Ha, during the year 2017, with positive anomalies in the months of February (14.2%), May (14.4%), July (15.8%), August (15.6), September (14.2%) and November (16.1%) with humidity above the mean value and negative anomalies in the months of January (13.5%), March (13.5%), April (13.8%), June (13.9%), October (12.6%) and December (11%), during the 2017 period.

Keywords: SAR. Delta index. Sentinel 1. Wetlands.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, perteneciente a la cuenca Cachi en la Región Ayacucho, se ha convertido en la principal fuente proveedora de agua para toda la población Ayacuchana, de donde se recolecta agua en la primera bocatoma Apacheta para ser trasladada por travesía a la represa de Cuchoquesera. Apacheta no es ajena a la intervención de la mano del hombre y al cambio global, por lo que es de suma importancia monitorear la dinámica de sus humedales. Una de las herramientas de mejor uso y de fácil acceso son las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) que no manifiestan ningún tipo de problema con la presencia de nubes y mejor aún sin son de libre disponibilidad. En el presente trabajo de investigación tratamos de dar respuesta a la pregunta ¿en qué medida el uso de imágenes de radar Sentinel 1A y 1B caracterizan la dinámica espacial de los humedales en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta de la Región Ayacucho?, de esta manera se

plantea una metodología que consiste en aprovechar el uso del índice delta para el cálculo del área de superficie que contiene humedad (Hallikainen et al., 1985).

Los sistemas SAR, son sistemas activo de emisión y medición de radiación electromagnética con el objetivo de detectar y localizar elementos en la superficie terrestre (Richards, 2009). El uso de las imágenes de radar Sentinel 1A y 1B de banda C y de fácil acceso, permiten obtener información del suelo, hasta 6 cm por debajo de su superficie, esto hace que la información que nos proporcione sobre suelo húmedo sea fiable, además que no existe la preocupación de la existencia de nubes para poder acceder a dicha información. Los satélites Sentinel, monitorean la tierra y capturan datos en un modo de franja ancha interferométrica, lo que significa que requiere tres escaneos y luego los combina en una sola imagen. Cada escaneo tiene un ancho de 250 km y una resolución espacial de 5 m x 20 m, con un ciclo de repetición de seis días para un área determinada en la tierra

(European Space Agency, 2017).

La cabecera de cuenca Cachi Apacheta cuenta con una estación meteorológica, la que proporciona datos diarios de precipitación, velocidad de viento, temperatura máxima y mínima, dichos han sido sometidos a una evaluación mediante herramientas estadísticas para determinar modelos de series de tiempo del comportamiento de la vegetación en zonas de humedales o bofedales y su respuesta a la incidencia de la precipitación, además de permitir la determinación de la estacionalidad del comportamiento de la precipitación, factor principal e influyente en la presencia de humedad en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta (Moncada et al., 2015).

El pre procesamiento y procesamiento de las imágenes de radar Sentinel 1, se realizan mediante el uso de los software SNAP, QGIS y ENVI 5.3, donde el trabajo técnico es muy importante para lograr obtener la información que se encuentra implícita en cada imagen de radar, principalmente la eliminación del ruido speckle que contiene cada imagen, mediante métodos adecuados de filtración como el método "Gamma Map", además de la corrección de la pendiente o la normalización de la pendiente de acuerdo al ángulo de incidencia local proyectado en el plano del rango, a partir de ello, la imagen de radar queda libre de ruido y corregida radiométrica y geoméricamente, así con ayuda de la calculadora raster se obtienen el indicador de presencia de humedad en el suelo de Apacheta calculado a partir del índice delta, el mismo que caracteriza pixeles que contienen información de la presencia de humedad del suelo entre los valores 0,36 y 0,52 y que permite determinar de acuerdo a la cantidad de pixeles, el área de la superficie que contiene humedad, este procedimiento se realiza para cada imagen de radar durante el periodo de tiempo comprendido durante el año 2017 (Kellndorfer et al., 1998).

La retro dispersión de las ondas de radar desde el suelo está altamente influenciada por el contenido de humedad presente en el suelo, por ello es posible afirmar que la intensidad del backscattering es directamente proporcional a su contenido de humedad en el suelo, la constante dieléctrica y la humedad volumétrica, para distintas frecuencias y para distintos tipos de composición granulométrica del suelo (Ulaby et al., 1986).

Los datos extraídos de las imágenes de radar Sentinel 1A y 1B procesadas, se analizan mediante los estadígrafos adecuados, como el cálculo de anomalías para la determinación del comportamiento de la dinámica de la humedad presente en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, durante el año 2017.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio de la presente investigación se encuentra en la cabecera de Cuenca Cachi-Apacheta, ubicada en las zonas más altas de la cuenca Cachi en la provincia de Cangallo, departamento de Ayacucho, por el norte es compartida con la provincia de Huaytara en el departamento de Huancavelica. Posee un área de superficie de 14161.4 Hectáreas. El área de estudio se ubica en el huso WGS84-18S, enmarcada entre las coordenadas geográficas 13° 17' 5.32" S (526046.418228 UTM) y 13° 26' 12.417" S (540755.87805 UTM) latitud sur y entre los 74° 37' 24.599" W (8514530.22427 UTM) y 74° 45' 34.324" W (8531355.20191 UTM) longitud oeste, con una altitud media aproximada de 4651 m.s.n.m., su altura mínima es 4112 m.s.n.m. y su altura máxima es 5045 m.s.n.m. La figura 01 muestra la ubicación demográfica de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, ubicada en las alturas de la cuenca Cachi en la Región Ayacucho.

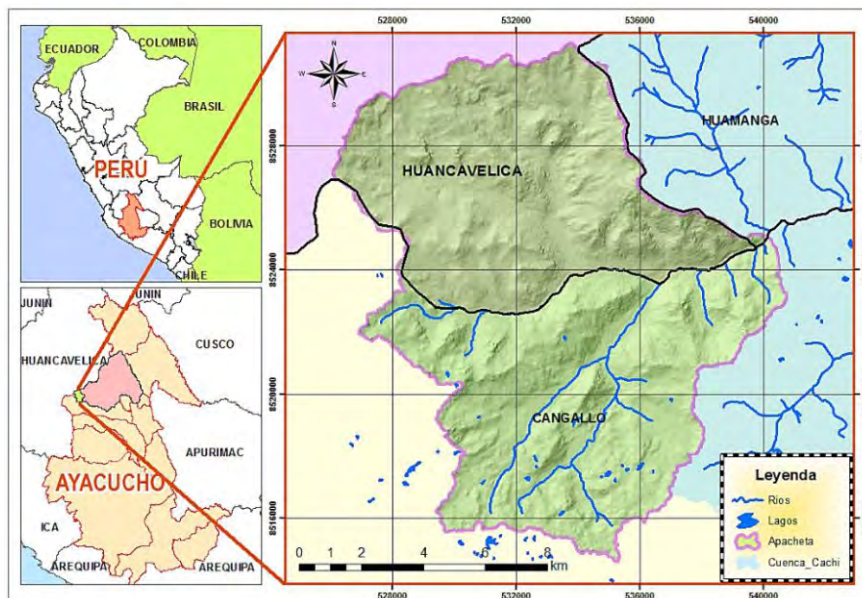


Fig. 1. Ubicación demográfica de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho.

Las imágenes de radar Sentinel 1A y 1B se procesan con el software SNAP, con el cual se caracterizan las zonas que contienen humedales mediante el cálculo del índice delta, a partir del valor de este índice se ubican los humedales y se establece un rango de detección comprendido entre 0,36 y 0,52. Este rango de valores permite la detección de cambios y

el establecimiento de un descriptor de la humedad del suelo, además de tomar en cuenta los datos proporcionados por la estación meteorológica Apacheta como los patrones climatológicos en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, como la precipitación, temperatura, velocidad de viento, dichos patrones climatológicos son influyentes en los

ecosistemas de humedales de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta.

En primer término, la metodología involucra indicadores y descriptores biofísicos como información acerca de la dinámica de la humedad de los suelos y humedales de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta. También se considera el establecimiento de la distribución estacional anual de la precipitación, la que tiene relación directa con la presencia de humedad en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta. En segundo término, los estudios conllevan a la identificación y establecimiento de los principales descriptores y procesos climatológicos que ejercen presión sobre los humedales de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta.

Con las imágenes de Radar Sentinel-1A, se pretende realizar la exploración de la humedad del suelo de Apacheta y su comportamiento, lo suficiente para observar la dinámica de humedad con respecto a la raíz de la vegetación, con lo que se pretende caracterizar la composición interna de los humedales para el entendimiento del comportamiento de la

dinámica de los humedales en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta. En base a las relaciones establecidas, se evalúa el comportamiento de la dinámica de los ecosistemas de humedales teniendo en cuenta la importancia e influencia de los forzadores, a la vez que brindan el soporte científico para establecer posibles alternativas que refuercen la resiliencia de los ecosistemas de humedales.

La instalación del software SNAP (Sentinel Application Platform) se realiza directamente desde la página web de descarga, de los diferentes toolboxes por separado para los respectivos satélites Sentinel, o descargarlos todos integrados en SNAP : <http://step.esa.int/main/download/>

SNAP es un toolbox SAR de código abierto para: Lectura, Pre-procesamiento, Análisis y visualización. Compatible con las misiones ESA SAR: ERS1-2, ENVISAT ASAR, Sentinel-1. El pre-procesamiento de la imagen de radar Sentinel 1A y 1B, correspondiente al área de estudio, con SNAP, sigue los siguientes pasos:

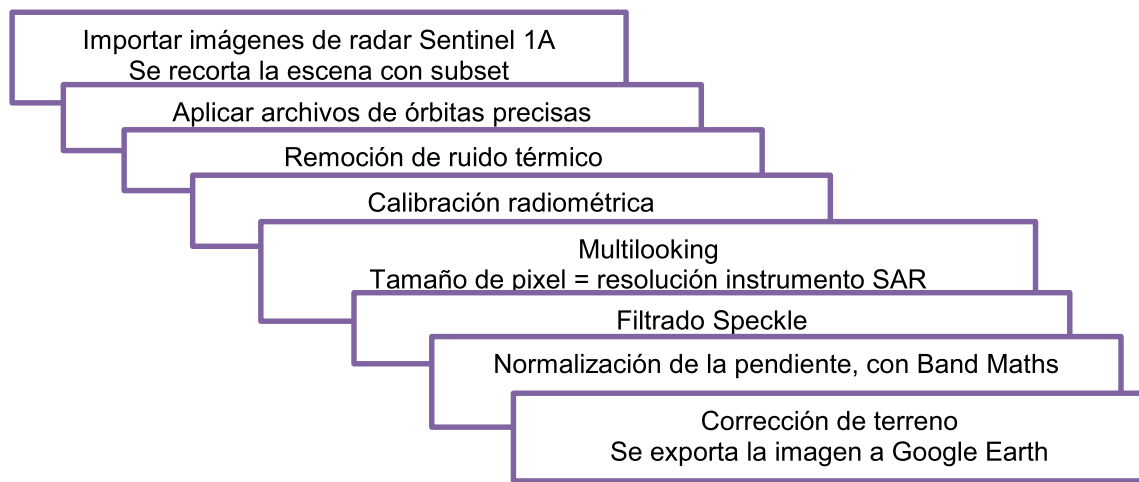


Fig. 02: Procedimiento a seguir para el pre procesamiento de las imágenes de radar Sentinel 1, para la zona de estudio comprendida en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho.

Se han procesado 12 imágenes de radar Sentinel 1A y 1B con el software SNAP, una imagen por mes, siguiendo el mismo procedimiento con todas las imágenes, que para facilidad del pre procesamiento y procesamiento se recorta la imagen de radar teniendo en cuenta las coordenadas de la zona de estudio ubicada en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, durante el año 2017, comprendida en el área establecida por las coordenadas, latitud: -13.24448; -13.48211 y longitud -74.55918; -74.81862.

Las imágenes de radar se someten a los pasos indicados en la figura 02, donde la corrección de la pendiente o la normalización de la pendiente de acuerdo al ángulo de incidencia local proyectado en el plano del rango se logra con la ecuación 1 (Kelndorfer et al., 1998):

$$\sigma_{Norm}^0 = \sigma_{Elipsoidal}^0 * \frac{\text{sen}(\theta_{DEM})}{\text{sen}(\theta_{Elip.})} \quad (1)$$

Donde: θ_{DEM} , es el ángulo incidente local y $\theta_{Elip.}$ es el ángulo incidente SAR.

La expresión de la ecuación 1 se aplica a cada una de las dos bandas Sigma0_VV y Sigma0_VH de acuerdo a como se muestran en las ecuaciones 2 y 3:

$$\frac{\text{Sigma0}_{VV} * \sin(\text{PI} * \text{LocalIncidenceAngle}/180)}{\sin(\text{PI} * \text{incidenceAngleFromEllipsoid}/180)} \quad (2)$$

$$\frac{\text{Sigma0}_{VH} * \sin(\text{PI} * \text{LocalIncidenceAngle}/180)}{\sin(\text{PI} * \text{incidenceAngleFromEllipsoid}/180)} \quad (3)$$

Se calcula el índice delta como indicador de la humedad, de acuerdo a la expresión $\text{abs}((b1-b2)/b2)$, correspondiente a la ecuación 4(Thoma et al., 2006):

$$\text{Índice Delta} = \left| \frac{\sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0}{\sigma_{dry}^0} \right| = \left| \frac{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VH}^0} \right| \quad (4)$$

Donde se considera que $\sigma_{wet}^0 = \text{Sigma0}_{VV_Norm_db}$ y $\sigma_{dry}^0 = \text{Sigma0}_{VH_Norm_db}$.

De esta manera se obtiene una imagen con pixeles entre 0 y 1 que caracteriza la humedad del suelo, luego se procede a la clasificación de las áreas húmedas reconociendo que los pixeles de valores comprendidos en el rango de 0,36 y 0,52

corresponden a las zonas húmedas y que deben ser contados y tabulados para cada imagen. Luego, las imágenes ya procesadas se guardan en formato Tiff para ser cortadas sobre el límite de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, en formato shape, haciendo uso del software QGIS.

Posteriormente, se terminan de procesar cada imagen con el software ENVI 5.3, de donde se extraen los píxeles que contienen humedad con ayuda de la herramienta estadística, se generan los mapas de humedad del suelo haciendo una clasificación de dicha humedad en el rango establecido, los productos obtenidos expresan píxeles conteniendo información de la presencia de humedad en la superficie del suelo de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta.

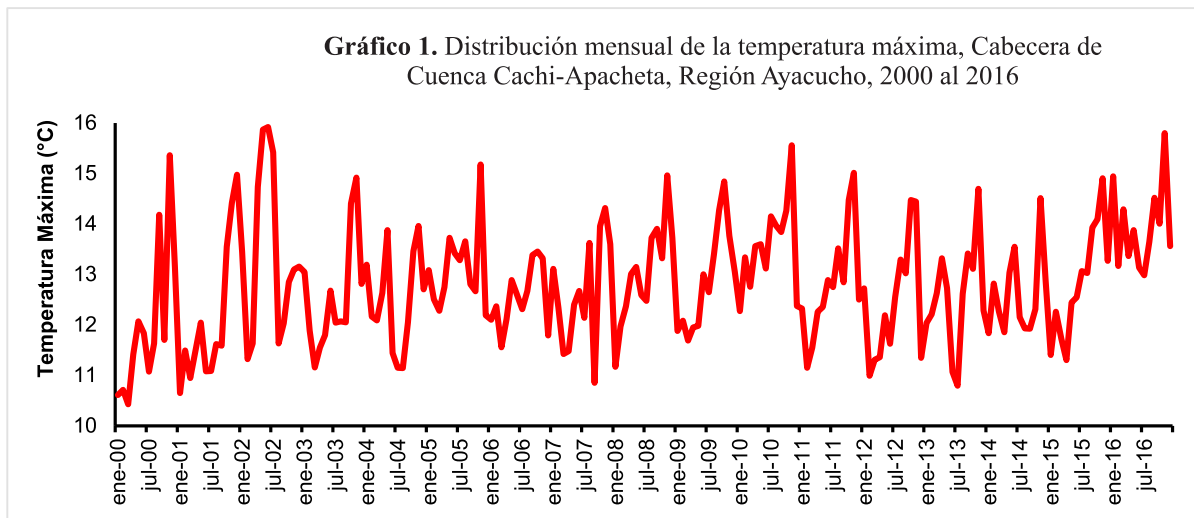
De esta manera se ha logrado caracterizar los píxeles que contienen humedad con el índice delta que correlaciona muy

bien con la humedad del suelo, tomando valores de píxeles comprendidos entre **0,36 y 0,52** correspondientes al índice delta, el cual es un índice positivo, que relaciona las bandas Sigma0_VV_Norm_db y Sigma0_VH_Norm_db.

Como producto final se obtienen los mapas temáticos correspondientes a la dinámica espacial de humedales con una distribución superficial de la humedad del suelo caracterizada para todos los píxeles que contienen humedad entre los valores 0,36 y 0,52 del índice delta, y que se denotan de color celeste en las imágenes de radar Sentinel 1A y 1B para diferentes fechas durante el año 2017, en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta. Posteriormente se aplican los estadígrafos adecuados y se realiza el análisis de los resultados a partir del área de humedad del suelo en cada mes, durante el año 2017.

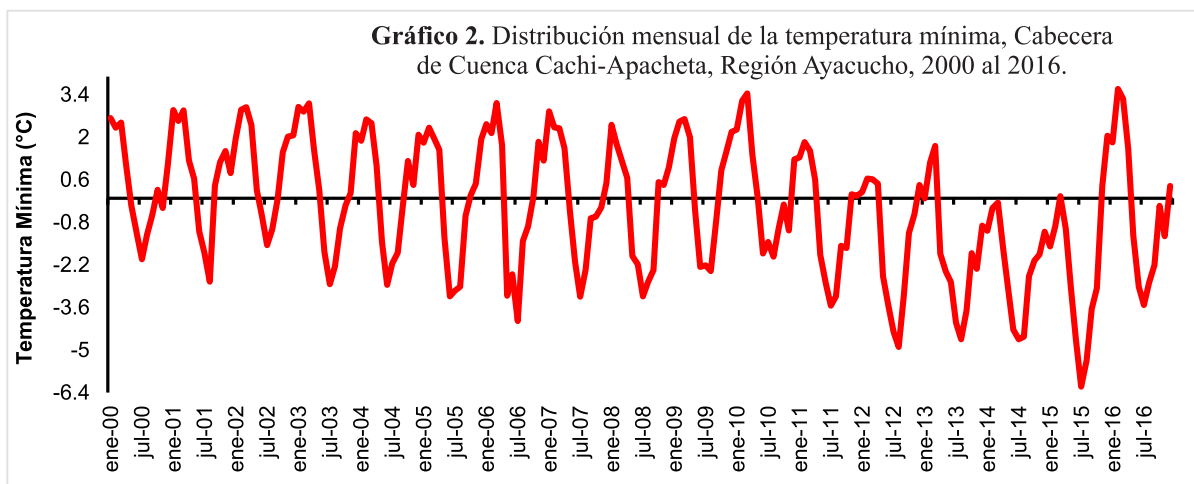
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. El análisis de los patrones climáticos como indicadores biofísicos de la dinámica espacial de humedales, corresponden a los datos de la estación meteorológica Apacheta.



Interpretación: En el gráfico 1 se observa que la serie de la temperatura máxima diaria de la Cabecera de Cuenca Cachi-Apacheta de la Región Ayacucho durante el periodo 2000 al 2016, presenta movimientos ascendentes y descendentes recurrentes siendo acentuados a mediados del 2002 que presenta una temperatura que varía de 11°C a 16°C, luego se

muestra una disminución cuya variación está por debajo de 15°C, para volver a incrementarse en el año 2010 alcanzando una temperatura aproximada de 15.5 °C, en los años posteriores disminuye, presentando en el año 2015 y 2016 una variación de la temperatura en un rango de 13 °C a 14.5 °C.

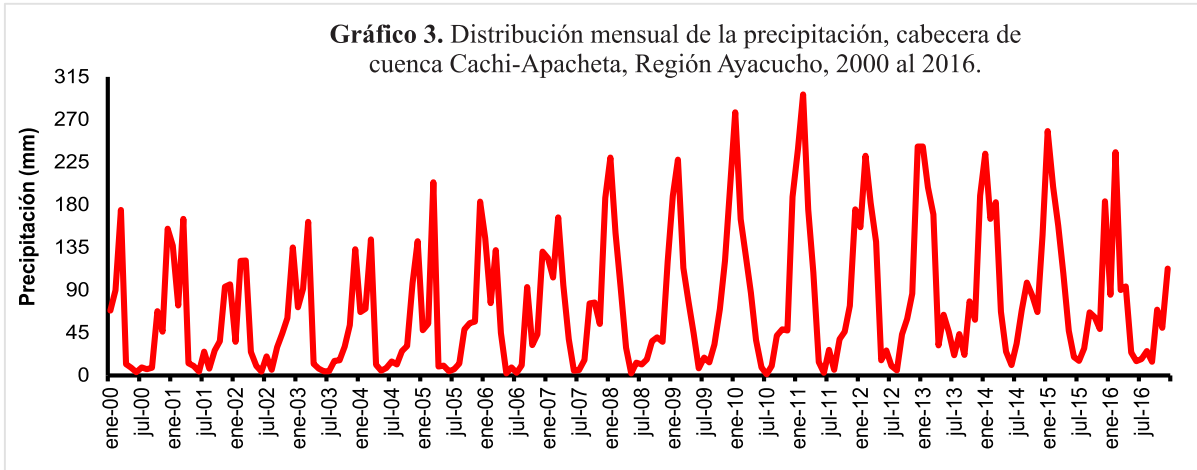


Interpretación: En el gráfico 2, se observa las fluctuaciones cíclicas de la secuencia mensual de la temperatura mínima de la Cabecera de Cuenca Cachi-Apacheta de la Región

Ayacucho durante el periodo 2000 al 2016, estas se presentan generalmente en el rango de los 3°C a -5°C cuyo patrón cíclico se presenta a lo largo de los años del 2000 hasta

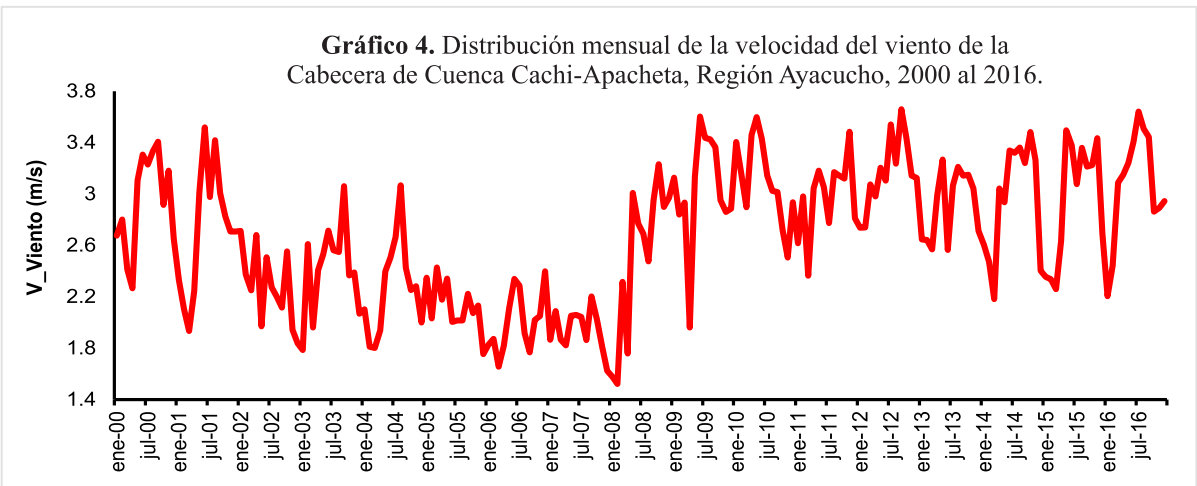
principio del 2010, donde en los ciclos posteriores la ondas cíclica tiene un rango de variación de 2.5 °C hasta -5 °C hasta aproximadamente el año 2015, luego para los años

posteriores el patrón del ciclo cambia presentando fluctuaciones que varían de 3 °C a -6°C aproximadamente.



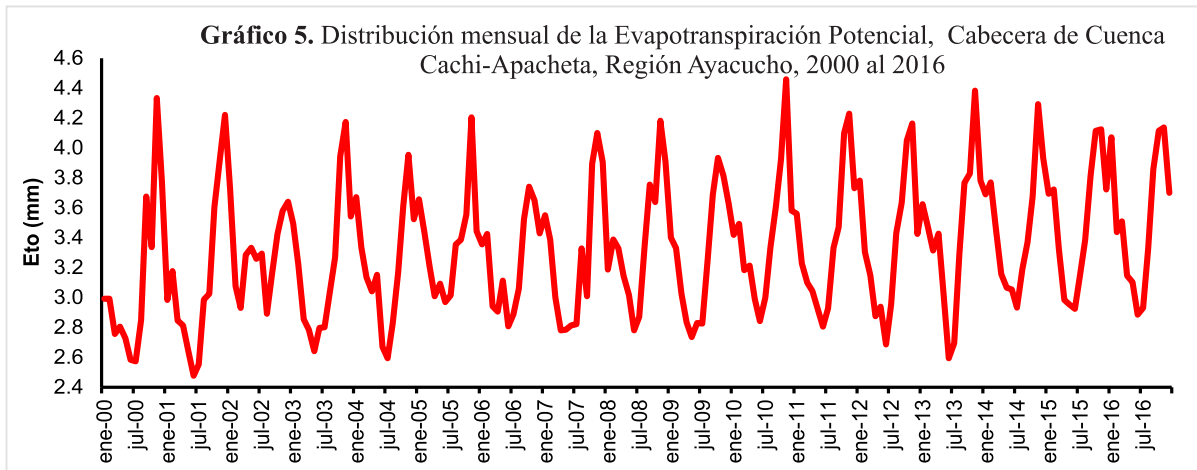
Interpretación: En el gráfico 3, se observa las fluctuaciones cíclicas de la secuencia mensual de la precipitación de la Cabecera de Cuenca Cachi-Apacheta de la Región Ayacucho durante el periodo 2000 al 2016, estas se presentan generalmente para el 2000 en el rango de los 0mm a 300mm,

con variaciones de disminución suaves hasta el año 2006, luego en los años siguientes se tiene ciclos cuyos picos alcanzan en el 2010 aproximadamente 300 mm, luego la precipitación disminuye en los años 2012 al 2016 cuya variación esta de 00 mm hasta 200 mm, similar a los años 2007 al 2009.



Interpretación: En el gráfico 4, se tiene la distribución de secuencia diaria de la **velocidad** del viento de la Cabecera de Cuenca Cachi-Apacheta de la Región Ayacucho durante el periodo del 2000 al 2016, cuya tendencia presenta variaciones cíclicas de la velocidad del viento que van desde

los 4 km/h hasta aproximadamente 9 km/h a lo largo del periodo de estudio, siendo durante el periodo del 2000 al 2005, donde se registra los picos mas altos, luego estos picos desiendo hasta aproximadamnete los 8 km/h, no observandose un probable incremento de la velocidad del viento.



Interpretación: En el gráfico 5, se tiene la distribución de secuencia diaria de la evapotranspiración de la Cabecera de Cuenca Cachi-Apacheta de la Región Ayacucho durante el periodo del 2000 al 2016, cuya tendencia presenta variaciones cíclicas de la evapotranspiración que van desde los 2.5 a aproximadamente 4.5 a lo largo del periodo de

estudio, presentando picos altos en el año 2002, 2010 y 2014, las oscilaciones de los ciclos presentan longitudes de onda que se pueden calificar como convergentes al patrón estacional de cada año, pero en el periodo del 2015 al 2016 la variación de la evapotranspiración está en el orden de 3 a 4 grados.

Tabla 1. estadígrafos del ajuste del modelo ARIMA de las variables de estudio en función de la temperatura máxima, mínima, velocidad del viento, precipitación y evapotranspiración de la cabecera de cuenca cachi-apacheta de la región Ayacucho, 2000 al 2016.

Estadístico de ajuste	Media	SE	Mínimo	Máximo	Percentil						
					5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	0,45	0,15	0,26	0,65	0,26	0,26	0,32	0,43	0,59	0,65	0,65
R cuadrado	0,73	0,13	0,54	0,86	0,54	0,545	0,61	0,76	0,83	0,86	0,86
RMSE	7,89	16,36	0,21	37,16	0,21	0,21	0,36	0,79	18,99	37,16	37,16
MAPE	41,86	56,77	4,79	134,69	4,79	4,79	4,81	6,49	96,59	134,69	134,69
MaxAPE	1627,05	2753,12	22,35	6382,91	22,35	22,35	22,76	29,99	4029,87	6382,91	6382,91
MAE	5,41	11,08	0,16	25,23	0,16	0,16	0,28	0,62	12,95	25,23	25,23
MaxAE	42,55	91,13	0,70	205,56	0,70	0,70	1,12	2,34	104,08	205,56	205,56
BIC normalizado	0,50	3,94	-3,01	7,22	-3,01	-3,01	-2,13	-0,26	3,52	7,26	7,26

Interpretación: En la tabla 1, se tiene el R² estacionaria igual a 0.453 y R² igual a 0.730, que indican que los modelos

ARIMA, del orden que se indica en la tabla adjunta presentan un ajuste adecuado.

Descripción del modelo			Tipo de modelo
ID de modelo	tmax	Modelo_1	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)
	tmin	Modelo_2	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)
	precip	Modelo_3	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)
	V_Viento	Modelo_4	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)

El modelo tiene un ajuste apropiado, puesto que las tres variables predictoras temperatura máxima y mínima, velocidad del viento y precipitación explican en un 73% el comportamiento de la parte regular de la serie temporal y de

forma similar las variables predictoras explican en un 45.3 % el comportamiento de las variaciones estacionales de la serie temporal a lo largo del periodo 2000 al 2016.

Tabla 2. Coeficiente de determinación y evaluación de las auto correlaciones del modelamiento de la nieve en función de la temperatura máxima, mínima, velocidad del viento y precipitación de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta de la región Ayacucho durante el periodo del 2000 al 2016.

Modelo	Estadísticos de ajuste del modelo		Ljung-Box Q(18)			Valores atípicos
	R ² - estacionaria	R ²	Estadísticos	DF	Sig.	
tmin-Modelo_2	0,534	0,864	40,500	16	0,001	3
V_Viento-Modelo_4	0,432	0,801	26,650	15	0,032	1
Eto-Modelo_5	0,388	0,762	20,745	16	0,189	0
precip-Modelo_3	0,256	0,688	13,517	17	0,701	0
tmax-Modelo_1	0,654	0,535	23,309	16	0,106	7

Interpretación: En la tabla 2, se observa que el ajuste de los modelos ARIMA especificados en la tabla anterior presenta el estadístico Ljung-Box Q (18) que supone la hipótesis nula que la serie de datos de las variables en estudio se distribuyen de forma independiente, de modo que cualquier correlación observada es resultado del proceso aleatorio del muestreo, frente a la hipótesis alterna que postula que la serie de datos de las variables no se distribuyen de forma independiente.

presentar un Ljung-Box Q(18) de 26.65 con un p-valor de 0.032 que es menor que el nivel de significancia de $\alpha=0.05$, indica no independencia de los datos seriales.

Estas hipótesis se evalúan con un 95% de confianza y reportan un Ljung-Box Q(18) para la temperatura mínima de 40.5 con un p-valor de 0.001 que es menor que el nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, e indica que la serie de datos de las variables no se distribuyen de forma independiente, de forma similar se tiene que la velocidad del viento por

Para los demás casos, el estadígrafo Ljung-Box Q(18) presenta el valor 20,745 para evapotranspiración y un p-valor de 0,189; para la precipitación Ljung-Box Q(18) es 13,517 con un p-valor de 23,309; para la temperatura máxima con un p-valor de 0,106 que indican que los datos aportan información suficiente para validar la hipótesis nula, dado que se distribuyen de forma independiente o que los residuos del modelo no son correlacionados. Por lo tanto, los modelos ARIMA (p,q,d)(p,q,d) se puede usar para realizar las predicciones de las series de tiempo de las variables predictoras.

La tabla 3 muestra los valores medios, máximos y mínimos de la distribución estacional de la precipitación acumulada mensual, mínima y máxima en la cabecera de cuenca Cachi Apacheta, para el periodo comprendido entre los años

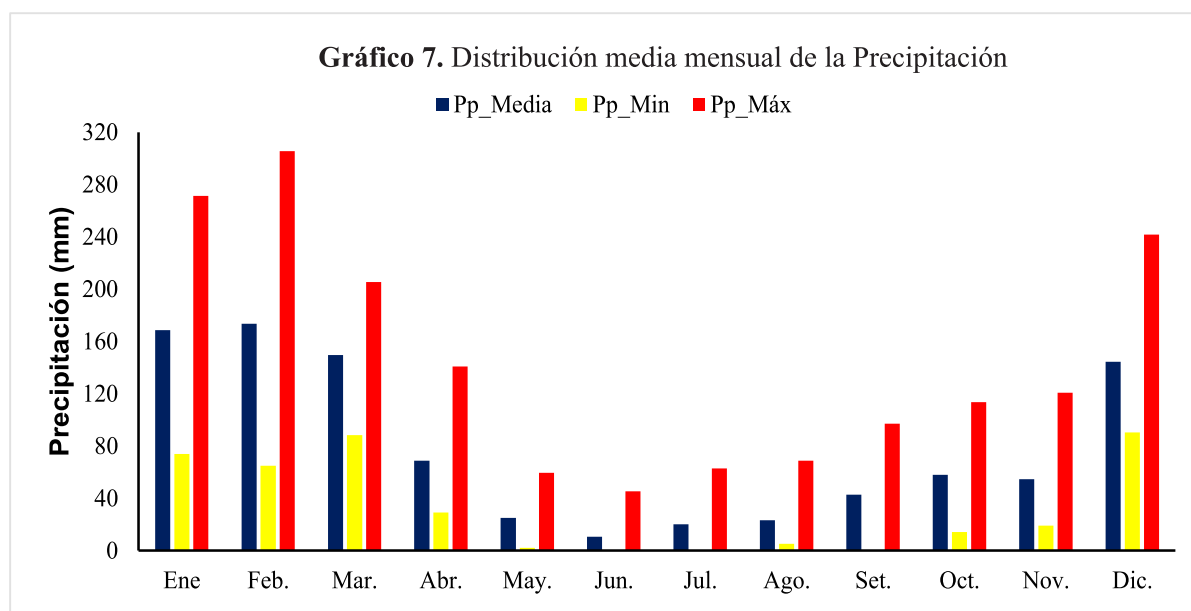
2000 al 2016, de los cuales se ha caracterizado la presencia de precipitación en tres grandes grupos: lluvioso, seco e intermedio, de acuerdo al comportamiento estacional de la precipitación durante todo el año.

Tabla 3. Precipitación acumulada media mensual, mínima y máxima, en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta

Mes	Pp_Media	Pp_Min	Pp_Máx
Enero	168.623529	73.9	271.2
Febrero	173.527647	64.8	305.53
Marzo	149.697059	88.3	205.3
Abril	68.7223529	29.2	140.7
Mayo	24.9535294	2	59.5
Junio	10.6394118	0	45.3
Julio	20.0735294	0	62.87
Agosto	23.2664706	5.1	68.8
Setiembre	42.8341176	0	97.1
Octubre	57.9476471	14.15	113.62
Noviembre	54.6629412	19.18	120.8
Diciembre	144.43	90.5	241.6
Media	78.2815196	32.26	144.36

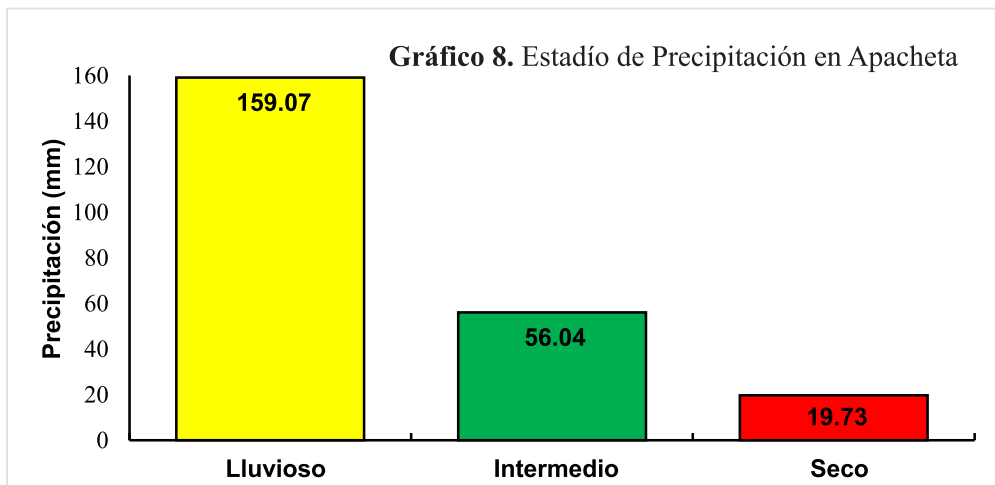
El gráfico 7, muestra el histograma de la precipitación acumulada media mensual, mínima y máxima, se observa que entre los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se presenta una mayor precipitación en intensidad y frecuencia, por lo que se le denomina estadio lluvioso. Los meses de mayo, junio, julio y agosto presentan poca o nada

precipitación en intensidad y frecuencia, por lo que se le denomina estadio seco. Así mismo, se denomina estadio intermedio a la presencia de precipitación en los meses de abril, setiembre, octubre y noviembre. De esta manera se explica el comportamiento de la precipitación a lo largo de los meses del año.



La precipitación media anual fluctúa entre los 32,26 mm a 144,36 mm, siendo su valor medio anual de 78,28 mm; según su intensidad se distinguen tres estadios, un estadio lluvioso en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo con una precipitación media anual de 159,07 mm, un estadio intermedio en los meses de abril, setiembre, octubre y

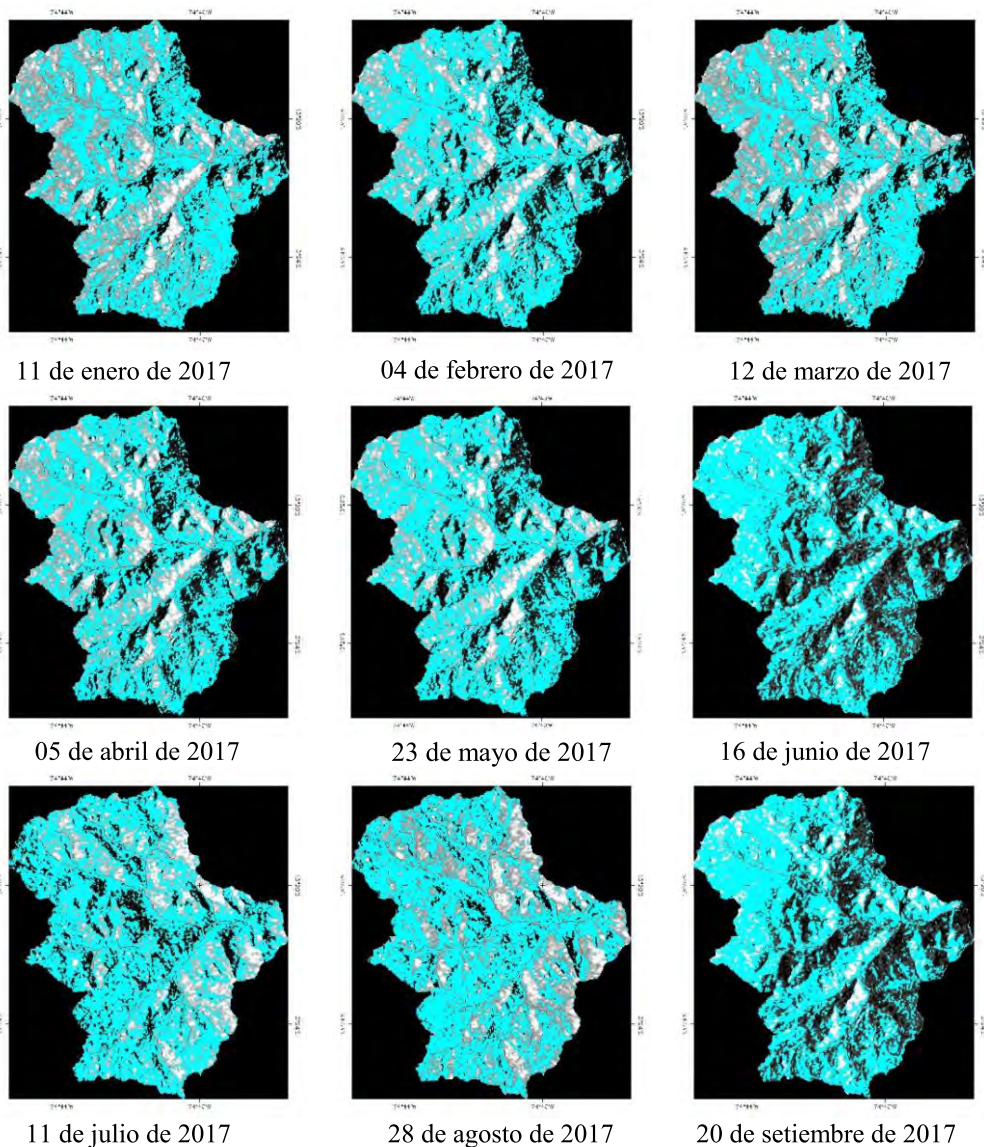
noviembre con precipitación media anual de 56,04 mm y un estadio seco en los meses de mayo, junio, julio y agosto con precipitación media anual de 19,73 mm, tal como se muestra en el gráfico 8, lo que permite comprender el comportamiento estacional de la precipitación a lo largo de los meses del año.

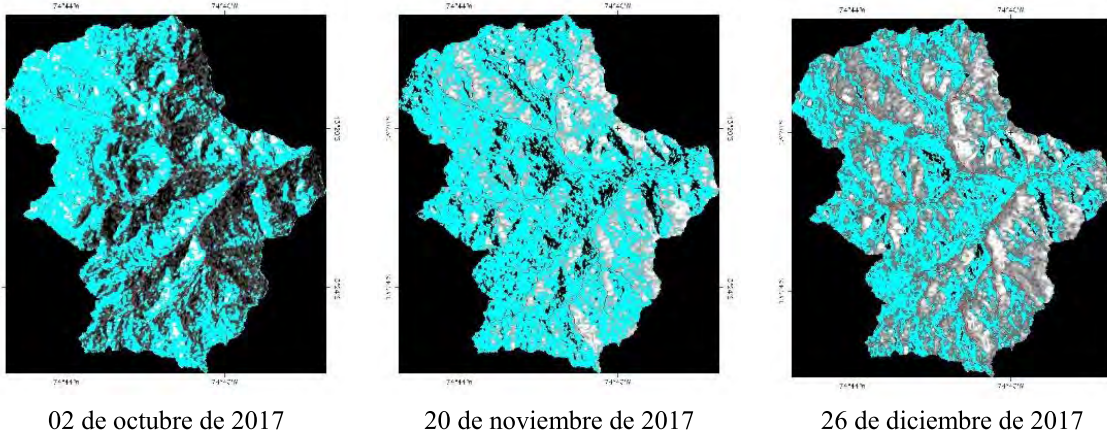


En la tabla 4.1 se observa los mapas mensuales de la distribución espacial de la humedad del suelo obtenida a partir del cálculo del índice delta caracterizado en las imágenes de radar Sentinel 1A y 1B, clasificadas de color celeste dentro del rango de valores 0,36 y 0,52 característico de la humedad del suelo y que permite realizar una evaluación por pixel para explicar el comportamiento de la

dinámica espacial de los humedales; también se observa que las líneas de color rojo representan los tributarios o ramales de descarga superficial de agua que convergen a la parte más baja y que dan lugar al nacimiento del río Apacheta en la primera bocatoma de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho.

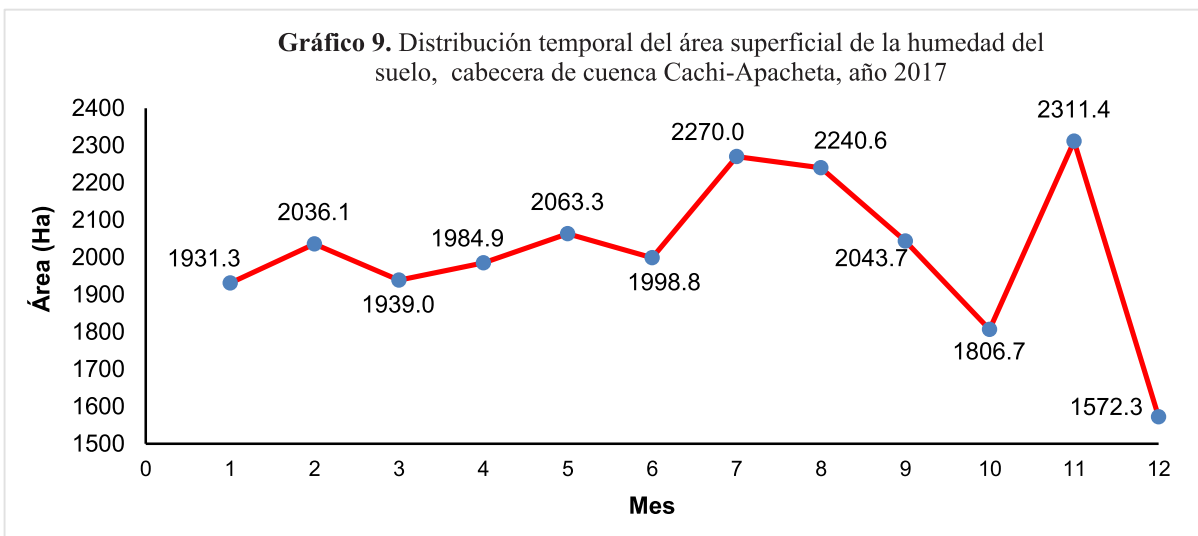
Tabla 4.1. Caracterización superficial de la humedad del suelo con imágenes de radar Sentinel 1A y 1B, cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, año 2017





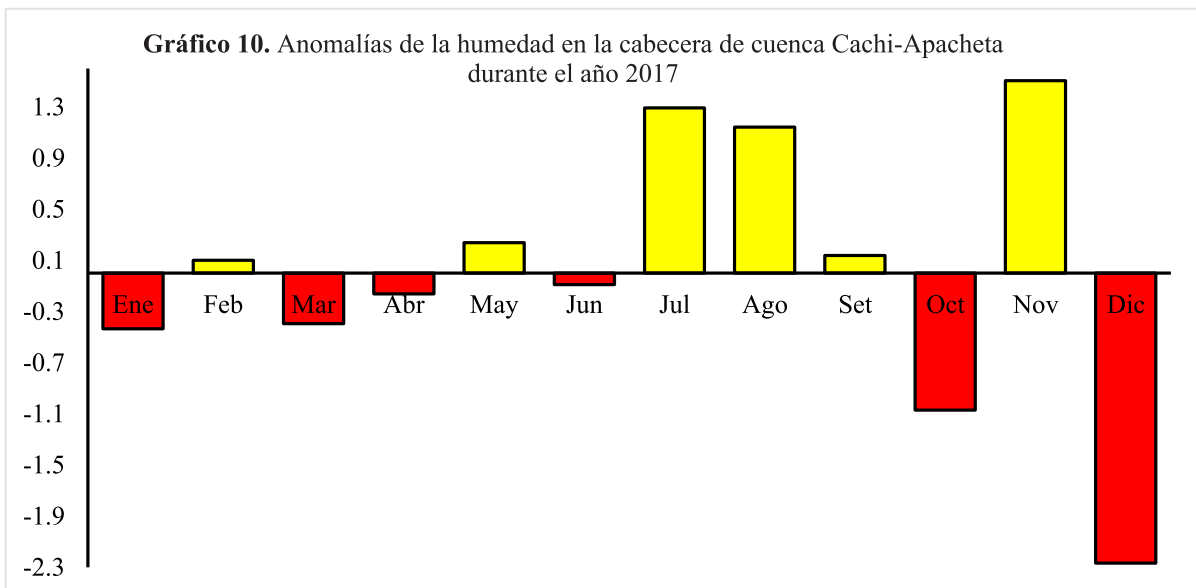
4. El gráfico 9 muestra la distribución temporal del área superficial de la humedad del suelo en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta durante el año 2017, se observa un fuerte incremento de humedad en los meses de julio,

agosto y noviembre, así como una pronunciada baja de humedad en los meses de marzo, julio, octubre y diciembre.



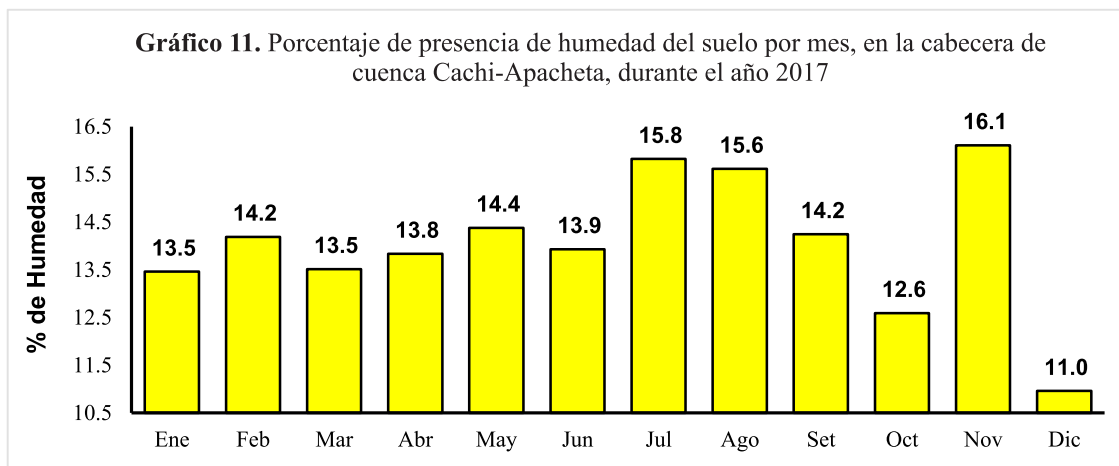
5. El gráfico 10 muestra las anomalías que presenta el comportamiento de la humedad en relación al valor medio del área de la superficie de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta durante el año 2017. Se entiende que la humedad cubre un área media de 2016.5 Ha, durante el año 2017, así que los meses que presentan una fuerte

disminución de la humedad son los meses de octubre y diciembre, los meses que presentan una mediana baja de humedad son los meses de enero y marzo, observándose un gran incremento de humedad en los meses de julio, agosto y noviembre.



6. En el gráfico 11, se observa que en el mes de noviembre se presenta un alto porcentaje de humedad de 16.1%, comparado con los otros meses de distribución de presencia de humedad de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta. Así mismo, se observa un bajo porcentaje de humedad en el mes de diciembre de 11% comparado con los otros meses del año. Por otro lado se observa que en

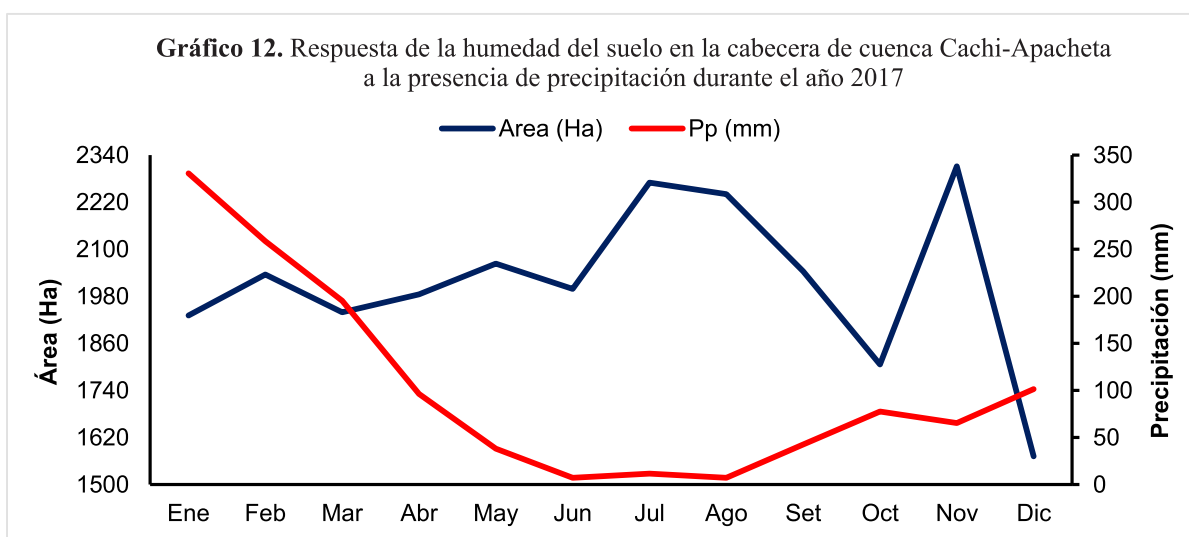
los meses de enero a junio la presencia de humedad fluctúa entre 13.5% a 13.9%, además se observa que en el periodo de julio a octubre, presentan picos altos para julio y agosto con porcentajes de 15.8% y 15.6% respectivamente, luego empieza a descender en el mes de octubre hasta 12.6%.



La precipitación estacional media anual fluctúa entre los 32,26 mm a 144,36 mm, siendo su valor medio anual de 78,28 mm; según su intensidad se distinguen tres grupos muy notable a los cuales se les denomina estadios, un estadio lluvioso en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo con una precipitación media anual de 159,07 mm, un estadio intermedio en los meses de abril, setiembre, octubre y noviembre con precipitación media anual de 56,04 mm y un estadio seco en los meses de mayo, junio, julio y agosto con precipitación media anual de 19,73 mm.

los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, al cual también se le suma el aporte de humedad por efecto de presencia de nieve y del derretimiento inmediato durante los meses de junio y julio; así mismo en el mes de noviembre se tiene un máximo de humedad presente en el suelo de Apacheta, posiblemente debido al inicio del estadio lluvioso. En el mes de octubre se muestra un valor bajo en la distribución espacial de la humedad, esto se debe al decaimiento de la presencia de humedad a partir de los meses de julio, agosto y setiembre, dado que julio y agosto corresponden a los meses de estadio seco pero con presencia de nieve. El incremento de humedad se aprecia a partir del mes de enero fluctuando hasta el mes de julio, donde el incremento es mayor debido a la presencia de nieve en dicha zona.

7. En el gráfico 12, se observa que la presencia de humedad del suelo en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, se muestra muy pronunciada en los meses de julio, agosto, debido al efecto tardío de la presencia de precipitación en



El valor medio de la distribución espacial de la humedad en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta es de 2016.5 Ha, durante el año 2017, así que por debajo de esta valor los meses que presentan una fuerte disminución de la humedad corresponden a los meses de octubre y diciembre, así mismo

los meses que presentan una baja presencia de humedad son los meses de enero y marzo, por lo que los meses de julio, agosto y noviembre presenta un gran incremento de la distribución espacial de la humedad, por encima del valor medio. La alta presencia de humedad en el mes de noviembre

se debe posiblemente por el inicio del estadió lluvioso; así mismo existe un ligero incremento, por encima del valor medio, de la presencia de humedad en los suelos de Apacheta en los meses de febrero, mayo y setiembre.

Durante los meses de enero-agosto la cantidad de humedad presente en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta fluctúa desde 13.5% a 15.6%, siendo el mes de noviembre con 16.1% el mes que presenta un alto porcentaje de humedad comparado con los demás meses durante el año 2017. El mes de diciembre presenta un 11% de humedad y es el mes de menor porcentaje de humedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

European Space Agency, 2017. Sentinel-1 [WWW Document]. Eur. Space Agency. URL http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (accessed 10.25.17).

Hallikainen, M., Ulaby, F.T., Dobson, M.C., 1985. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. *Trans. Geosci. Remote Sens. GE-23*, 25–34. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289497>

Kellndorfer, J.M., Pierce, L.E., Dobson, M.C., Ulaby, F.T., 1998. Toward consistent regional-to-global-scale vegetation characterization using orbital SAR systems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1396–1411. <https://doi.org/10.1109/36.718844>

Moncada, W., Pereda, A., Aldana, C., Masias, M., Jimenez, J., 2015. Cuantificación hidrográfica de la cuenca del río Cachi-Ayacucho, mediante imágenes satelitales. *Inst. Investig. Científica E Innov. Tecnológica UNSCH II*.

Richards, J., 2009. *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer, New York.

Thoma, D.P., Moran, M.S., Bryant, R., Rahman, M., Holifield-Collins, C.D., Skirvin, S., Sano, E.E., Slocum, K., 2006. Comparison of four models to determine surface soil moisture from C-band radar imagery in a sparsely vegetated semiarid landscape. *Water Resour. Res.* 42. <https://doi.org/10.1029/2004WR003905>

Ulaby, F., Moore, R., Fung, A., 1986. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, From Theory to Applications*. Addison Wesley Publishing Company, United States.