

DOI: 10.24850/j-tyca-14-05-06

Artículos

**Caracterización hidroquímica de una subcuenca
altoandina en el departamento de Moquegua, Perú**
**Characterization of the hydrochemistry in a high
Andean sub-basin in the region of Moquegua, Peru**

Kimberly Visitación-Bustamante¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2531-413X>

Lia Ramos-Fernandez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3946-7188>

Lizardo Visitación-Figueroa³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9625-2066>

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Perú,
kvisitacionb@gmail.com

²Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Perú,
liarf@lamolina.edu.pe

³Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Perú,
lvisitacion@lamolina.edu.pe

Autora para correspondencia: Kimberly Visitación-Bustamante,
kvisitacionb@gmail.com



Resumen

El presente estudio evalúa la variabilidad hidroquímica del río Asana por influencia de la quebrada Millune en Moquegua, Perú. Se analizó la información de monitoreos de calidad de agua durante el periodo 2010-2018 a través de los diagramas de Gibbs, las relaciones molares, el diagrama de Piper, el diagrama de Stiff y el modelo hidrogeoquímico PHREEQC para la identificación de los índices de saturación de los principales minerales a los que están expuestos los cuerpos de agua en evaluación. El análisis por componentes principales permitió la identificación de la variabilidad de la hidroquímica en función de la naturaleza de la fuente y su estacionalidad. Los resultados obtenidos muestran que las aguas de la quebrada Millune, afluente del río Asana, son de naturaleza ácida con presencia de iones de aluminio y manganeso en concentraciones elevadas respecto a lo establecido en el ECA agua (estándar de calidad ambiental de agua), a diferencia del río Asana, que presenta concentraciones bajas; ambos ríos son de naturaleza sulfatada cálcica. Se determinó que los iones aluminio y manganeso se deben a la meteorización del mineral alunita y erosión del suelo, aporte mineral, por el deshielo paulatino del nevado Arundani, ubicado en la cabecera de cuenca del río Asana. Finalmente, el río Asana, por su capacidad de amortiguamiento, neutraliza las aguas ácidas y disminuye la solubilidad de los cationes disueltos.

Palabras clave: aluminio, hidroquímica, calidad del agua, erosión, Moquegua.



Abstract

This study evaluates the hydrochemical variability of the Asana River affected by the influence of the Millune Creek in Moquegua, Peru. The water quality monitoring data from 2010 to 2018 were analyzed using Gibbs diagrams, molar ratios, Piper diagrams, Stiff diagrams, and the PHREEQC hydrogeochemical model for the identification of water saturation indices and the main minerals to which the bodies of water were exposed. Principal component analysis enabled the identification of the variability of the hydrochemistry as a function of the source and its seasonality. The results showed that the waters of Millune Creek, a tributary of the Asana River, were acidic in nature and had high concentrations of aluminum and manganese ions with respect to what was established in the ECA water (Environmental Quality Standard for Water), while the Asana River had low concentrations. Both rivers naturally have calcium sulfate. The aluminum and manganese ions were from the weathering of the mineral alunite and the erosion of the soil mineral contribution by the gradual thawing of the Arundani Mountains, which are located at the origin of the Asana River basin. Finally, the Asana River, due to its buffering capacity, neutralizes acidic waters and decreases the solubility of dissolved cations.

Keywords: Aluminum, hydrochemistry, water quality, erosion, Moquegua.

Recibido: 22/04/2021

Aceptado: 15/03/2022

Introducción

El agua es un recurso vital e indispensable (Vörösmarty *et al.*, 2010; Qin, Liu, Yan, & Huang, 2019), que forma parte de los ecosistemas naturales; su composición hidroquímica es influenciada por factores naturales, como el ciclo hidrológico, las condiciones climáticas, el suelo, contaminación de origen geológico (Hamzah, Aris, Ramli, Juahir, & Sheikhy-Narany, 2017; Devic, Djordjevic, & Sakan, 2014; De-Andrade, Palácio, Souza, De-Oliveira-Leão, & Guerreiro, 2008; Helena *et al.*, 2000), factores antrópicos y por efecto del cambio climático.

El Perú, por su naturaleza mineralógica debida a la presencia del sistema montañoso de los Andes, genera condiciones que propician la dispersión de metales en los cursos de agua (Villena-Chávez, 2018). Por ello, son necesarios estudios sobre la variación hidroquímica de las aguas superficiales para brindar información acerca del cambio ambiental, la relación entre la meteorización química regional, las reacciones hidrogeoquímicas y los mecanismos que la controlan (Jiang *et al.*, 2020).

Los suelos de naturaleza volcánica en zonas áridas como Moquegua influyen sobre la composición química del agua (Ece, Schroeder, Smilley, & Wampler, 2008; GRM, 2011; Luque-Poma, Pari-Pinto, Dueñas-Olivera, Huamán-Nieto, 2020). Asimismo, el deshielo de glaciares puede liberar

contaminantes a los cuerpos de agua, ya que exponen cobertura de la tierra que son fácilmente erosionables por las escorrentías generadas por efecto del deshielo y las elevadas pendientes (Ban, Lei, Chen, & Liu, 2016); estos suelos contienen diversos minerales, como la alunita y caolinita, entre otros (Carrino, Crosta, Toledo, Silva, & Silva, 2015), que aportan al agua metales como aluminio, manganeso, hierro y aniones como sulfatos.

La quebrada Millune y el río Asana, afluentes del río Ilo-Moquegua, se encuentran al extremo sur occidental del Perú, en el departamento de Moquegua, y nacen de los nevados de naturaleza volcánica Arundani y Chuquiananta (GRM, 2011; ANA, 2018). Estudios previos informan de la principal química iónica de los ríos más grandes del mundo, como el Amazonas (Gibbs, 1970). Sin embargo, en el Perú, la mayoría de estudios se centran en el diagnóstico del cumplimiento de los estándares de calidad ambiental, mas no en la naturaleza y variabilidad hidroquímica, por lo que se requiere un análisis exhaustivo de la variación espacio-temporal de la calidad del agua y los cambios ambientales que se dan en la cuenca. Para esto último, es importante identificar los mecanismos que controlan la composición del agua, información que permite identificar las fuentes naturales o antrópicas de contaminación de metales al agua; estos mecanismos pueden ser por meteorización de roca, precipitación, evaporación o ingreso de aguas residuales (Gibbs, 1970; Gao *et al.*, 2017).

La integración de las investigaciones hidroquímicas, que implican análisis químicos y estadísticos, se llevan a cabo para evaluar los factores

que controlan la hidroquímica y contaminación potencial (El-Alfy, Aref, Fathy, & Abdulaziz, 2017) debido a que el estudio de la hidroquímica de aguas naturales puede proporcionar información importante sobre el cambio ambiental (Han & Liu, 2000; Gao *et al.*, 2017). Por este motivo, identificar los factores y procesos a través de los cuales las actividades naturales y/o humanas afectan la variabilidad hidroquímica de los ríos proporciona una base científica para la protección ambiental, el desarrollo económico y el avance académico. En este estudio se caracteriza la variabilidad hidroquímica de la quebrada Millune y del río Asana para identificar los mecanismos que controlan la composición química, a fin de evaluar la influencia en la calidad del agua.

Área de estudio

La zona de estudio comprende la subcuenca del río Asana (Figura 1), específicamente el área de confluencia de la quebrada Millune con el río Asana, misma que se extiende en una altitud que varía de 3 071 a 5 492 msnm, en el distrito de Torata, al noreste de la ciudad de Moquegua, Perú. La cuenca alta del río Asana está formada por laderas de pendientes menores al 36 %, con factor de forma de 0.27 y coeficiente de compacidad de 1.51, que sugieren una respuesta rápida frente a la escorrentía; en tanto que la quebrada Millune tiene un área drenante de 23.645 km² y un caudal medio anual de 0.143 m³/s (Knight Piésold Consultores, S. A., 2008). El basamento rocoso está constituido por la unidad lito estratigráfica "Súper Unidad Yarabamba" (KsP-ya/di) y la

formación Huaylillas (Nm-hu). Presenta un clima templado subhúmedo y boreal frío, según la clasificación de Köppen, con lluvias anuales estacionales de 243 a 460 mm/año, sobre todo de enero a marzo (Montesinos, Cleef, & Sykora, 2012; Rau, 2017), y época seca de mayo a diciembre.

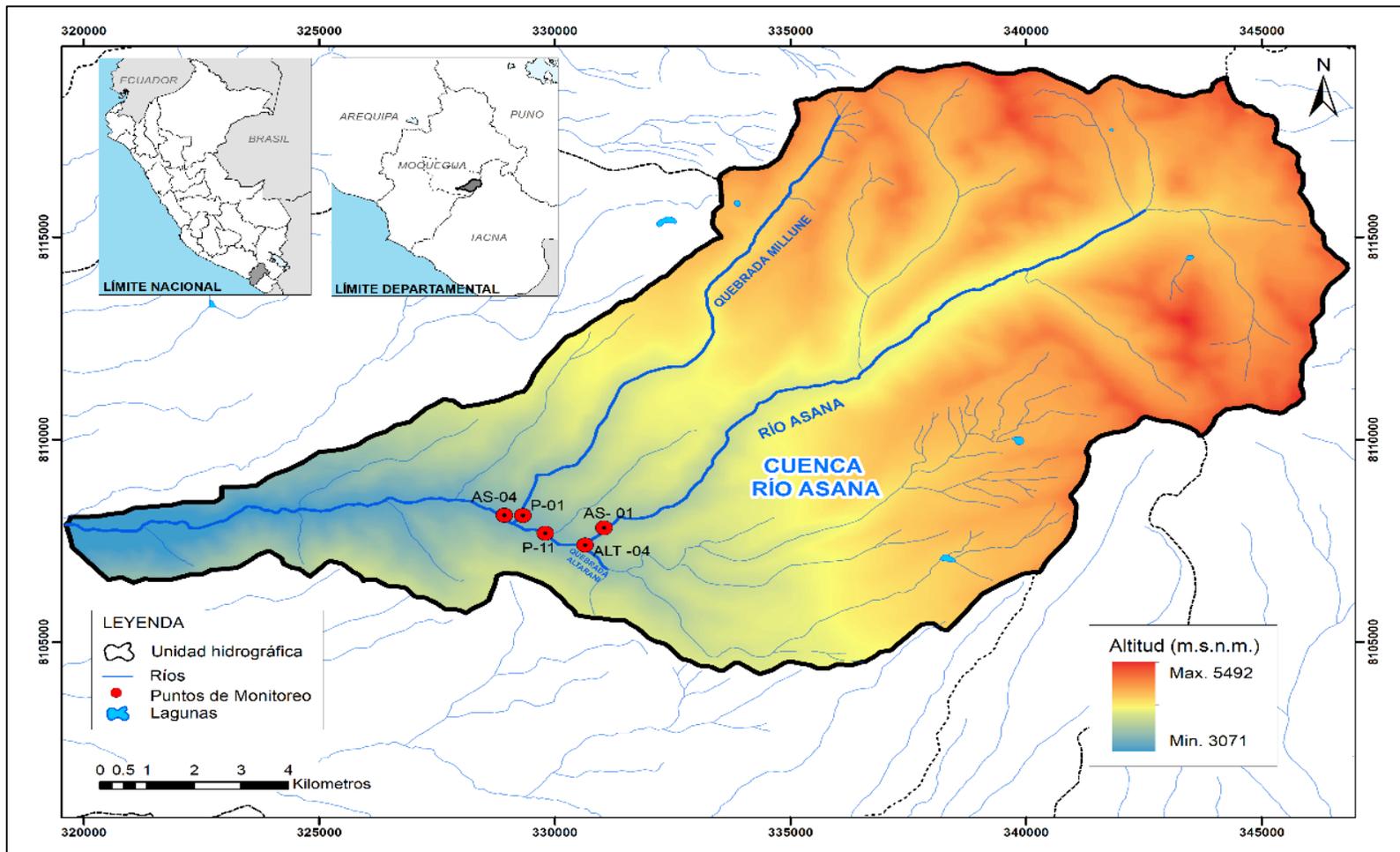


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Asana y su confluencia con la quebrada Millune.

Materiales y métodos

Información de calidad de agua

Las estaciones de monitoreo seleccionadas para la investigación fueron las siguientes: en el río Asana, aguas arriba de la confluencia con el quebrada Altarani (AS-01), aguas abajo de la confluencia con el quebrada Altarani (P-11) y aguas abajo de la confluencia con la quebrada Millune (AS-04); la estación en la quebrada Altarani aguas arriba, en confluencia con el río Asana ALT-04; y la estación en la quebrada Millune, aguas arriba de la confluencia con el río Asana (P-1). Se dispuso de información mensual de parámetros físico-químicos del periodo 2010-2018 tanto en época húmeda como seca.

Procesos que controlan la hidroquímica

La determinación de los procesos que controlan la hidroquímica se evaluó utilizando los diagramas de Boxplot, diagramas de Gibbs y las relaciones molares Mg/Ca-Mg/Na, Ca/Na-Mg/Na, Ca/Na-HCO₃/Na y Na-Cl (Gibbs, 1970; Gao *et al.*, 2017); la evaluación hidroquímica se evaluó utilizando el diagrama de Piper y el diagrama de Stiff (Stiff, 1951), los cuales se graficaron en el *software* AquaChem (Waterloo Hydrogeologic, 2020). Por último, se empleó la modelización geoquímica en el *software* PHREEQC

(Parkhurst & Appelo, 1999), para identificar de los índices de saturación que brindan información de la disolución y/o precipitación de los principales minerales a los que están expuestos los cuerpos de agua en evaluación.

Susceptibilidad a movimientos en masa

Los resultados hidroquímicos se representaron sobre el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa (Villacorta, Fidel, & Zavala, 2012), con la finalidad de entender los procesos que puedan estar involucrados. Este mapa expresa el grado de susceptibilidad en la escala muy baja, baja, media, alta y muy alta con base en los siguientes criterios: presencia de fallas, grado de meteorización, y existencia de depósitos superficiales y pendientes (Villacorta *et al.*, 2012).

Análisis por componentes principales

Se utilizó el análisis por componentes principales (ACP), técnica estadística de análisis multivariado, para evaluar la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua mediante la correlación de parámetros con factores que se asocian con una fuente u origen de la variabilidad, como escorrentía, precipitación, ingreso de agua subterránea y contaminación antrópica, entre otros (Ouyang, 2005; Jiang *et al.*, 2020).

Resultados y discusiones

La distribución de los resultados de los parámetros fisicoquímicos en el área de estudio en las épocas húmeda y seca (Figura 2) confirma que se tiene mayor lluvia en el periodo enero-abril (época húmeda) por efectos de la lluvia con respecto al resto del año (época seca), como se ha registrado históricamente en el periodo 1969-1999 (Ng, Peña, & Acosta, 2019). Las concentraciones de oxígeno disuelto toman valores máximos entre 6.8 y 7.9 mg/l, lo que indica que las principales fuentes de agua son superficiales, provenientes del deshielo de los nevados; sin embargo, al observar los valores mínimos que se encuentran entre 4.0 y 5.2 mg/l en las estaciones ALT-04, AS-01, P-11 y P-1, estaría relacionado con el aporte de aguas subterráneas (Schreier, Erlebach, & Albright, 1980) proveniente de las infiltraciones de rocas volcánicas fracturadas (Ng *et al.*, 2019). Los valores de pH en el río Asana y quebrada Altarani presentan valores entre 7.1 y 7.8. Del otro lado en la quebrada Millune los valores de pH fueron de naturaleza ácida 4.6 a lo largo del año, esto se debe a la baja capacidad buffer del agua y a la disolución de minerales sulfatados de aluminio como la alunita, provenientes del suelo rocoso de origen volcánico (Carrino *et al.*, 2015), que reducen el pH del agua por el consumo de iones hidroxilo, liberación de iones sulfatos y potasio (Acero, Hudson-Edwards, & Gale, 2015). Los valores de conductividad eléctrica en el río Asana y quebrada Altarani (84.8-174.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) son menores a los reportados para la quebrada Millune (342.4-369.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en temporada seca; los valores son más altos que los de temporada húmeda

por procesos de evaporación y reducción del caudal, así como por la mayor oxidación de metales que son liberados desde el suelo (Saarinen & Kløve, 2012). De igual forma, el contenido de sólidos disueltos totales fue mayor en la quebrada Millune en época seca. La dureza total en el río Asana y quebrada Altarani tiene valores entre 11.4 y 54.6 mg CaCO₃/l debido a la presencia de iones Ca y Mg en forma de bicarbonato y sulfato; sin embargo, en la quebrada Millune, los valores más altos de dureza total varían de 94.0 a 98.7 mg CaCO₃/l, en especial en época seca; esto posiblemente se debe a la presencia de Ca y Mg en forma de sulfato proveniente de la disolución de minerales sulfatados, como la alunita o jarosita (Acero *et al.*, 2015).

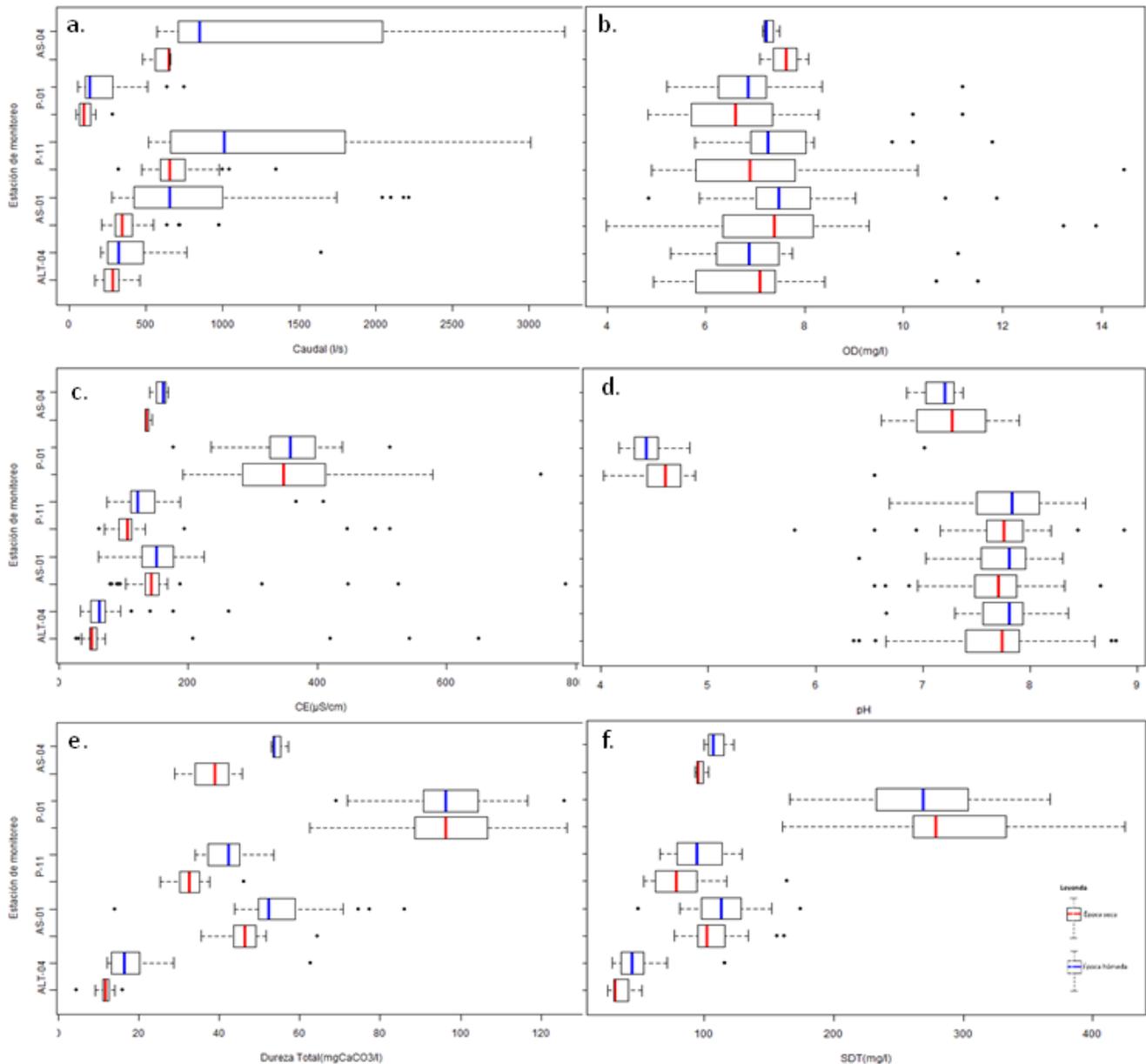


Figura 2. Diagrama de Boxplot de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua en época húmeda y seca: caudal (a); oxígeno disuelto (b); conductividad eléctrica(c); pH (d); dureza total (e), y sólidos disueltos totales (f) de los ríos Asana (AS-01 y P-11), Altarani (ALT-04) y Millune (P-1).

Por lo general, el análisis de cationes y aniones mayoritarios se realiza con los cationes calcio, magnesio, sodio y potasio, así como con los aniones bicarbonato, sulfato y cloruros (Thomas, Joseph, & Thrivikramji, 2015; Gao *et al.*, 2017). En nuestro estudio, con la finalidad de reducir el error en el balance iónico, se consideraron también como cationes mayoritarios al aluminio, hierro y manganeso debido a sus altas concentraciones (Fritz, 1994).

Los cationes mayoritarios en el área de estudio (Figura 3) indican que la concentración de los iones calcio, magnesio, potasio, aluminio, hierro y manganeso en el río Asana y quebrada Altarani fue mayor en época húmeda en comparación con la época seca. Esto se debe a que por efectos de las escorrentías, los cationes son arrastrados o solubilizados desde el material de suelo (Silas, Wuana, & Augustine, 2018); en el caso del sodio para la estación P-11 se da una dilución del catión, lo que sugiere que la fuente del sodio en esta zona es de naturaleza subterránea; situación similar ocurre en AS-04 (Cardona & Hernández, 1995). Por otro lado, las concentraciones de los cationes calcio, magnesio, sodio, potasio, aluminio, hierro y manganeso fue mayor en la quebrada Millune en temporada seca, la cual presenta valores diferenciados para los iones aluminio (9-5-10.7 mg/l) y manganeso (0.348-0.352 mg/l), en comparación con los valores que presentaron los iones aluminio (0.034-1.543 mg/l) y manganeso (0.004-0.075 mg/l) encontrados en los ríos Asana y Altarani. Los óxidos de manganeso y aluminio son los componentes más reactivos en suelos ácidos. Liberan los cationes por la

meteorización ácida de suelos minerales, que son reprecipitados como óxidos hidratados localmente o luego de una translocación; dichos precipitados pueden ser rápidamente removilizados, produciendo concentraciones altas de estos iones en el agua (Paterson, Goodman, & Farmer, 1991); situación similar a lo que sucede en la quebrada Millune. Los aniones mayoritarios del área de estudio (Figura 4) detallan que la concentración de iones bicarbonato en el río Asana y quebrada Altarani se encontró entre 15 y 22.4 mg HCO_3/l ; por otro lado, debido a los bajos valores de pH en la quebrada Millune, la concentración de bicarbonatos fue menor al valor detectable $< 0.1 \text{ mg HCO}_3/\text{l}$, siendo el dióxido de carbono disuelto la forma principal de carbono (Vega & Mustain, 2010). La concentración de iones sulfatos fue mayor en la quebrada Millune (159.8-171.3 mg/l), en comparación con las concentraciones encontradas en el río Asana y quebrada Altarani (5.1-51.8 mg/l) debido a la disolución de minerales sulfatados como la alunita (Carrino *et al.*, 2015). Por otro lado, la concentración de sulfatos fue mayor en época seca en la quebrada Millune a diferencia de los ríos Asana y Altarani, donde fue mayor en época húmeda; esto se debe al ingreso de agua subterránea y erosión de nuevos suelos del nevado de origen volcánico por incremento del deshielo en época seca (Grab, Linde, & De-Lemos, 2016).

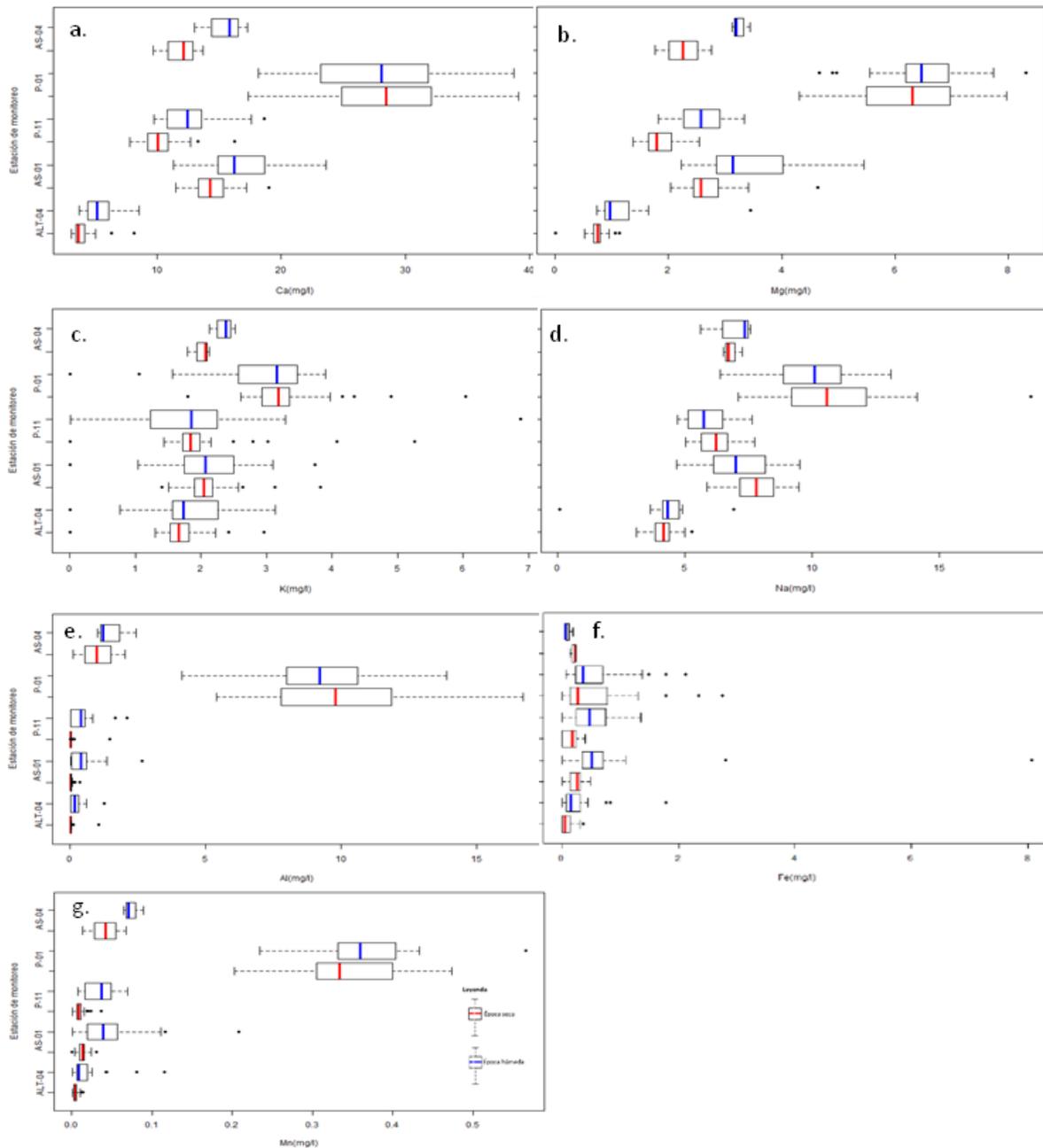


Figura 3. Diagrama de Boxplot de los cationes mayoritarios en época húmeda y seca: calcio (a), magnesio (b), potasio (c), sodio (d), aluminio (e), hierro (f) y manganeso (g) en el agua del río Asana, quebrada Altarani y quebrada Millune.

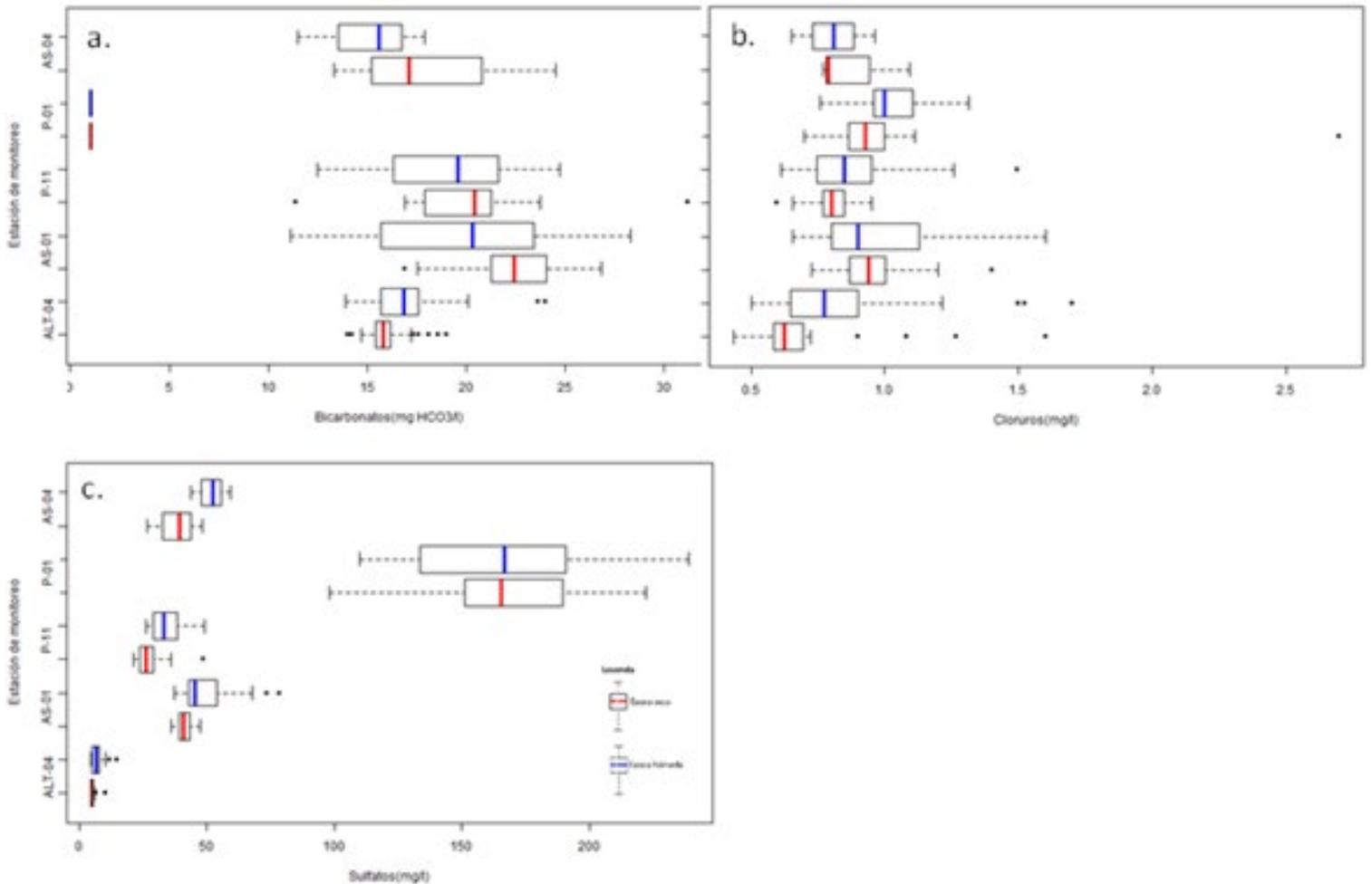


Figura 4. Diagrama de Boxplot de los aniones mayoritarios en época húmeda y seca: bicarbonatos (a), cloruros (b) y sulfatos (c) en el agua del río Asana, quebrada Altarani y quebrada Millune.

Mecanismos que controlan la hidroquímica

En el diagrama de Piper (Figura 5) se observa que la hidroquímica de las aguas de la zona de estudio se encuentra en dos grupos bien definidos: el agua en el quebrada Altarani en la estación ALT-04 presenta una clasificación de aguas bicarbonatadas cálcicas Ca-HCO_3 , mientras que las aguas en el río Asana (AS-01, P-11 y AS-04) y la quebrada Millune (P-1), presentan aguas sulfatadas cálcicas Ca-SO_4 . La influencia de las aguas alcalinas de la quebrada Altarani neutraliza la acidez del río Asana en la estación AS-01, la influencia de las aguas ácidas de la quebrada Millune (P-1) son neutralizadas por la capacidad buffer del río Asana, como se observa en la estación AS-04.

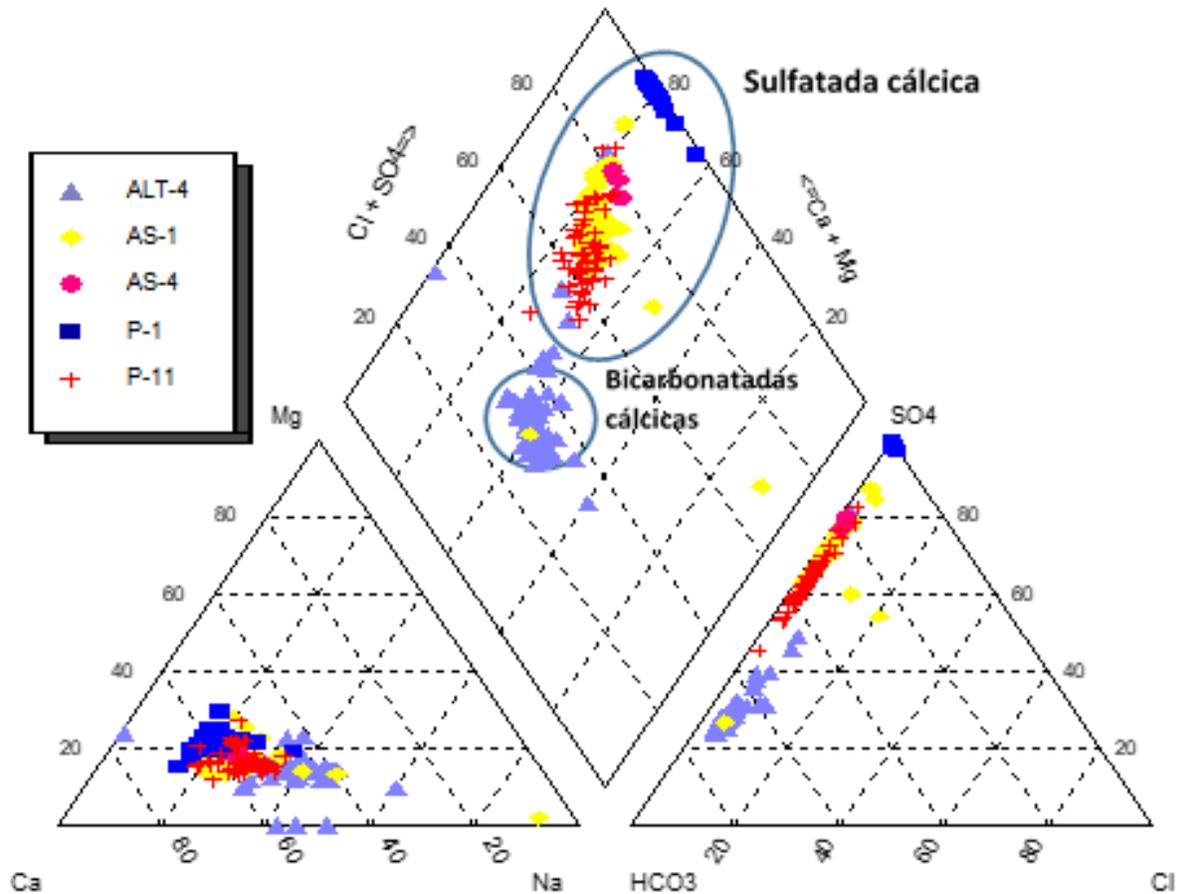


Figura 5. Diagrama de Piper de las aguas del río Asana y Quebrada Millune.

Las muestras de agua de las estaciones ALT-04, AS-01, P-11, P-1 y AS-04 se caracterizan por presentar concentraciones moderadas de sólidos totales disueltos (STD) y bajos valores de relaciones de $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ y $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$, que indican que el agua está dominada por productos de meteorización de rocas, en especial en la

quebrada Millune (P-1), tal como se observa en el diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970) (Figura 6).

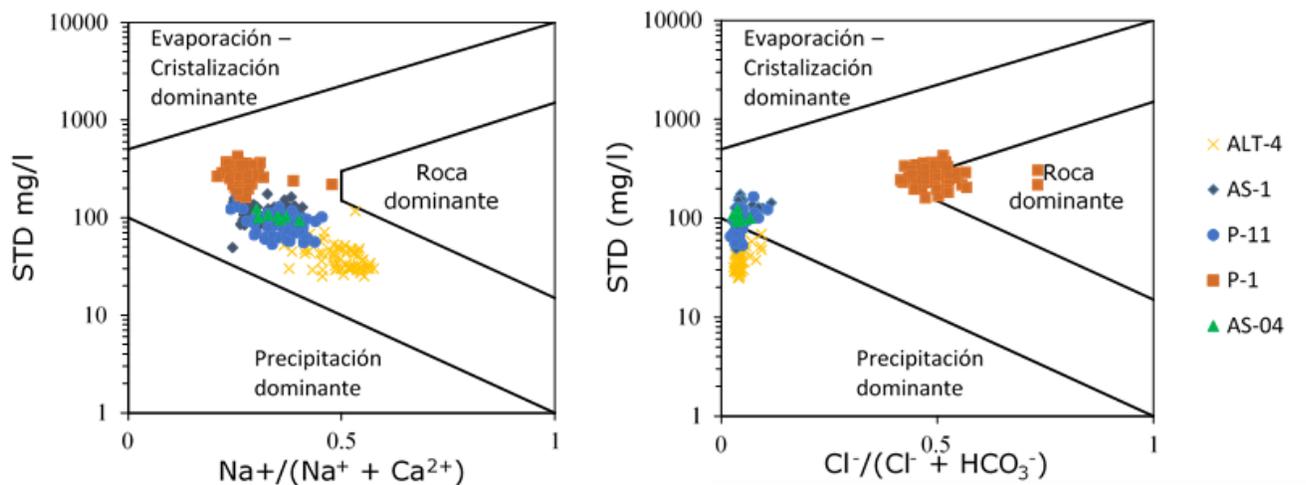


Figura 6. Química del agua de la quebrada Millune y el río Asana trazada en el diagrama de Gibbs: a) relación de cationes, (b) relación de aniones.

En el diagrama de las relaciones molares Mg^{2+}/Na^{+} vs. Mg^{2+}/Ca^{2+} (Figura 7) se verifica que en la quebrada Millune (P-1) las interacciones rocosas sean las que regulan las características de la química del agua, causadas por la erosión del suelo nuevo, producto del deshielo del glaciar aguas arriba y erosión de las riberas. Mientras que en el río Asana (AS-01, P-11 y AS-04) y en la quebrada Altarani (ALT-04), la disolución de sales solubles del suelo (lixiviación) es el proceso predominante.

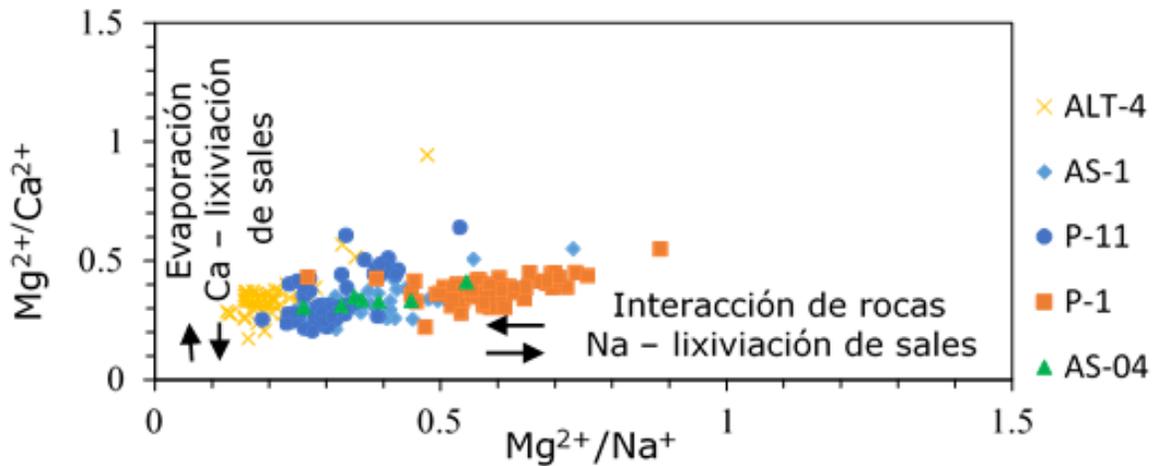


Figura 7. Diagrama de las relaciones molares de Mg^{2+}/Ca^{2+} vs. Mg^{2+}/Na^{+} .

El diagrama bivariado Mg^{2+}/Na^{+} vs. Ca^{2+}/Na^{+} y HCO_3^{-}/Na^{+} vs. Ca^{2+}/Na^{+} -(Figura 8) muestra que las estaciones ALT-04, AS-01, P-11, P-1 y AS-04 están principalmente dominadas por la meteorización del silicato; también se observa una baja relación de HCO_3^{-}/Na^{+} debido a que los bicarbonatos son consumidos por la acidez generada por la disolución de minerales sulfatados, confirmando la presencia de minerales aluminosilicatados y sulfatados, como la alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$).

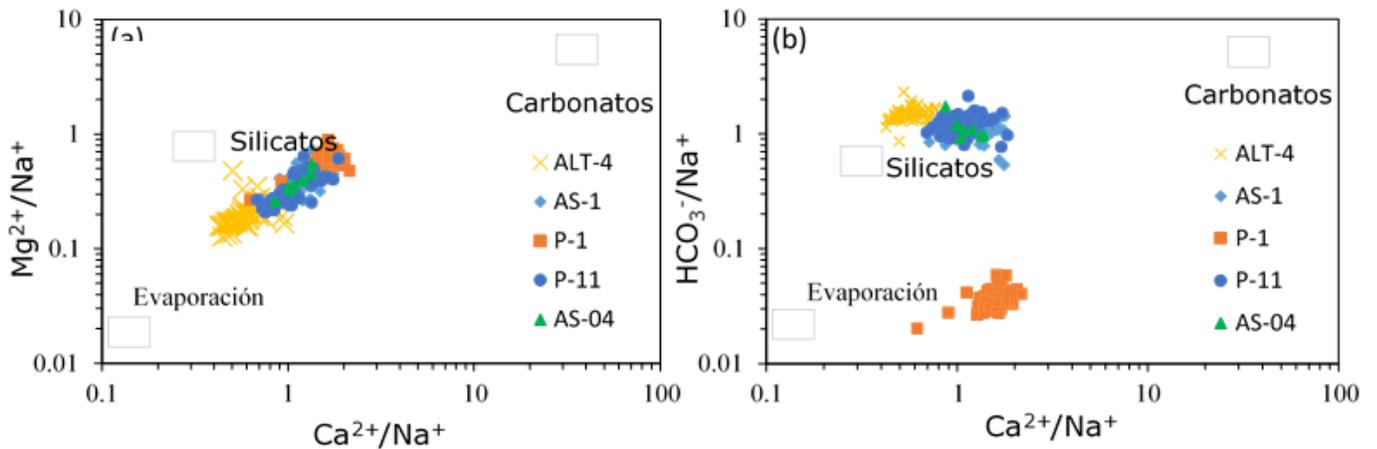


Figura 8. Diagrama bivariado de las relaciones molares de (a) Mg^{2+}/Na^{2+} vs. Ca^{2+}/Na^{+} y (b) HCO_3^{-}/Na^{+} vs. Ca^{2+}/Na^{+} .

Los resultados del modelamiento hidroquímico en PHREEQC (Figura 9) para los minerales más comunes en el agua de las estaciones de monitoreo evaluadas muestra que los valores de índices de saturación siguen la tendencia biotita > caolinita > alunita > jarosita > gibbsita > aragonita > anhidrita > manganita (Carrino *et al.*, 2015). Se tiene que los minerales biotita, caolinita, alunita, jarosita y gibbsita están súper saturados y se encuentran generalmente precipitados en las estaciones ALT-04, AS-01, P-11y AS-04. Sin embargo, su índice de saturación disminuye en la estación P-1 debido al bajo valor de pH, lo que promueve la disolución del aluminio y sulfatos. Por otro lado, minerales como la anhidrita y manganita no están saturados, por lo que se encuentran disueltos, lo cual incrementa la concentración de sulfatos y manganeso (Gao *et al.*, 2017) en las estaciones de monitoreo.

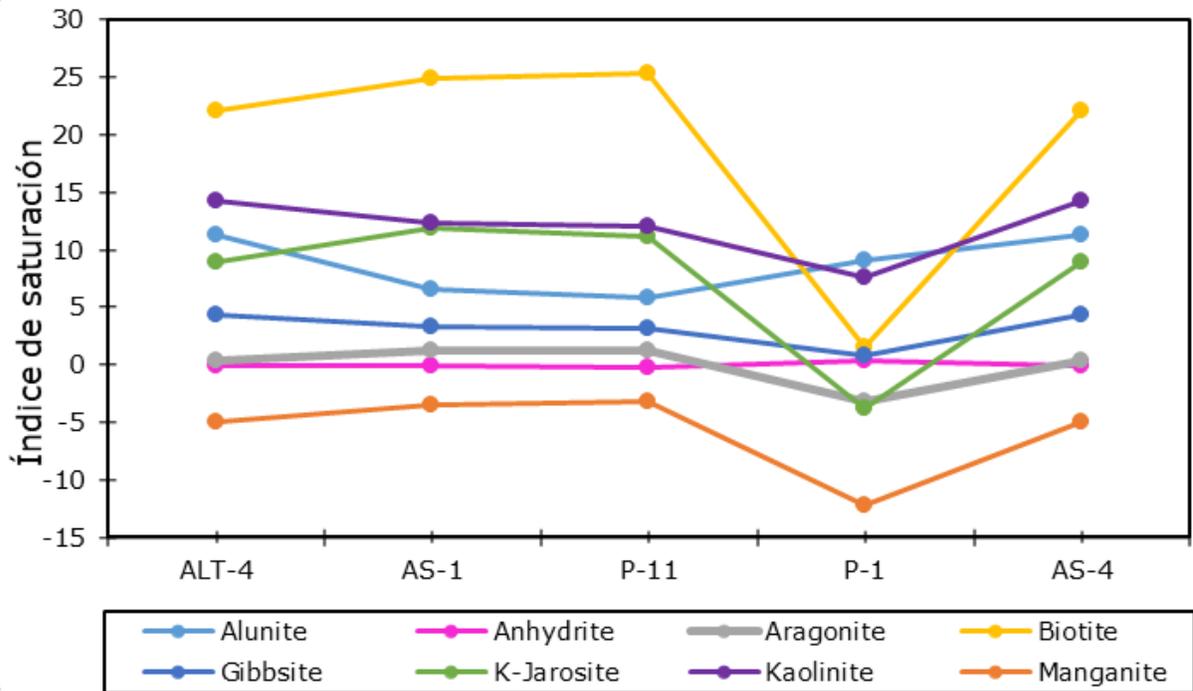


Figura 9. Índice de saturación (SI) para minerales comunes en la confluencia de la quebrada Millune y el río Asana.

Susceptibilidad a movimientos en masa

El área de confluencia de la quebrada Millune y el río Asana presenta alta susceptibilidad a movimientos en masa (Villacorta *et al.*, 2012) (Figura 10) debido a la alta meteorización, así como a la presencia de depósitos superficiales y altas pendientes, indicando que el área es muy propensa a procesos erosivos. En ese sentido se confirma que la erosión del suelo descubierto, por efecto del deshielo acelerado del glaciar Arundani (GRM,

2011; ANA, 2018), que da origen a la quebrada Millune, sería una razón por la que las reacciones en la cuenca dominan la composición química de las aguas superficiales.

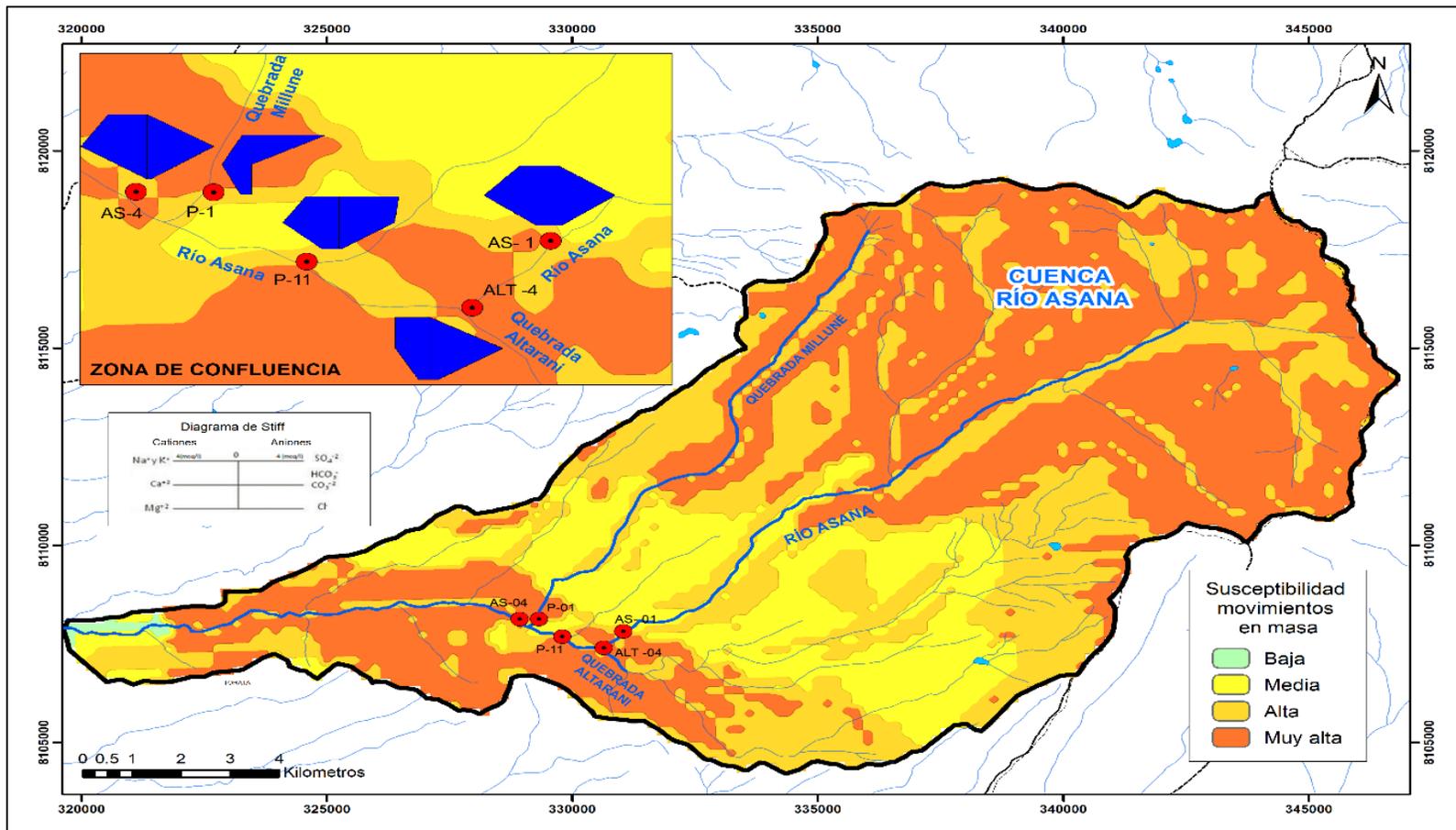


Figura 10. Mapa de susceptibilidad de movimientos en masa, confluencia de la quebrada Millune con el río Asana.

Análisis por componentes principales

En la Tabla 1 se detallan las correlaciones entre los principales factores asociados con la variabilidad espaciotemporal de la calidad del agua en los ríos evaluados; en la quebrada Altarani (ALT-04), el factor 1 se correlaciona positivamente con el caudal, dureza total, sólidos disueltos totales, cloruros, sulfatos, aluminio, calcio, hierro, magnesio y manganeso; esto se debe a la influencia de las lluvias sobre las escorrentías que transfieren los aniones y cationes por disolución desde el material de suelo o desprendimientos de suelo sobre el río (Silas *et al.*, 2018). El factor 2 se correlaciona con el potasio y nitrato, lo cual se debe tal vez a las actividades de naturaleza antrópica y disolución de material silicatado, como la biotita. El factor 3 se correlaciona positivamente con el incremento de la conductividad eléctrica por evaporación y disolución de metales con la disminución del pH en época seca (Saarinen & Kløve, 2012). En el río Asana, en las estaciones AS-01 y P-11, el factor 1 se correlaciona de modo positivo con el caudal, dureza total, sulfatos, aluminio, calcio, hierro, magnesio, manganeso y estroncio, pues en época húmeda, el efecto de la lluvia sobre las escorrentías disuelven metales y sulfatos del material de suelo o hay desprendimiento de suelo sobre el agua. El factor 2 se correlaciona de manera negativa con el caudal, lo que indica comportamiento diferenciado en época seca en el caso de AS-01, correlacionado con el bicarbonato y sodio por la influencia de agua subterránea, y en caso de P-11, correlacionado con menor contenido de aluminio.

Tabla 1. Análisis por componentes principales de la calidad del agua en la zona de estudio.

Parámetro	ALT-04			AS-01			P-11			P-1			AS-04		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Flujo	0.66	0.08	-0.33	0.63	-0.53	-0.08	0.50	-0.57	-0.44	-0.47	0.55	-0.07	0.14	0.95	-0.17
OD	-0.01	0.37	0.33	0.15	-0.21	0.52	0.33	-0.01	-0.41	-0.41	0.45	-0.02	0.12	-0.11	0.77
CE	0.04	0.26	0.75	0.141	-0.04	0.68	0.35	0.68	-0.17	0.40	0.18	0.23	0.46	-0.33	-0.74
pH	-0.04	-0.39	-0.65	-0.05	0.36	-0.39	-0.15	-0.28	0.60	-0.41	0.48	0.29	-0.26	0.30	0.68
HCO ₃	0.30	-0.03	-0.35	-0.68	0.59	0.005	-0.46	-0.23	0.46				-0.59	-0.61	-0.13
Dureza total	0.76	-0.47	0.23	0.78	0.40	-0.02	0.85	0.02	0.36	0.94	0.06	-0.07	0.97	0.19	-0.10
TDS	0.73	-0.31	0.46	0.41	0.29	0.43	0.62	0.52	-0.01	0.70	-0.002	-0.22	0.79	-0.19	-0.09
Cl ⁻	0.64	0.43	-0.08	0.48	0.42	0.15	0.64	0.01	0.21	-0.05	0.02	0.59	-0.77	0.41	-0.35
NO ₃ -N	0.68	0.52	-0.19	0.71	-0.35	0.13	0.71	-0.24	-0.21	-0.43	-0.25	0.54	0.17	0.90	-0.07
SO ₄	0.79	0.42	-0.13	0.85	0.13	-0.11	0.88	0.22	0.27	0.95	0.10	-0.05	0.92	-0.25	-0.21
Al	0.75	0.13	-0.13	0.78	-0.16	-0.20	0.58	-0.54	-0.12	0.77	0.36	0.11	0.77	-0.38	0.05
Ca	0.76	0.14	-0.09	0.72	0.29	-0.05	0.74	0.20	0.497	0.89	0.002	-0.02	0.93	-0.14	0.19
Fe	0.74	-0.14	-0.14	0.78	0.12	-0.17	0.74	-0.45	0	-0.13	0.68	0.19	-0.49	-0.69	-0.27
Mg	0.81	-0.47	0.11	0.85	0.05	-0.08	0.88	-0.19	0.03	0.85	0.15	0.07	0.94	0.23	-0.01
Mn	0.88	0.13	-0.141	0.89	-0.11	-0.21	0.86	-0.35	0.03	0.88	0.18	-0.02	0.92	0.04	0.05
K	0.34	0.57	0.21	0.41	0.19	0.45	0.37	0.63	-0.34	0.24	-0.04	0.55	0.74	0.65	-0.07
Na	0.43	-0.31	0.26	-0.12	0.85	-0.004	-0.20	0.10	0.49	0.55	-0.31	0.49	0.44	-0.85	0.26
Sr	0.86	-0.42	0.18	0.66	0.29	0.05	0.75	0.38	0.09	0.87	0.02	0.05	0.98	-0.17	0.03
%	40.73	52.98	63.37	38.78	51.83	59.93	39.87	53.9	64.34	42.31	51.64	60.08	49.1	73.83	85.02
	Fuertes				Moderadas				Débiles						

En la quebrada Millune (P-1), el factor 1 se correlaciona de forma positiva con la dureza total, sólidos disueltos totales, sulfatos, aluminio, calcio, magnesio, manganeso, sodio y estroncio, esto se debe a que en época seca, por mayor oxidación del material de suelo sulfatado, los valores bajos de pH disuelven los metales del lecho de la quebrada, así como por efecto de la fusión del hielo de los nevados, que lixivian metales del suelo nuevo. El factor 2 se correlaciona de modo positivo con el caudal, y el hierro, pues en época húmeda, la concentración de los metales se diluye por incremento del caudal; sin embargo, la correlación positiva con el hierro indica que la fuente de éste en la quebrada se debe al ingreso por escorrentías en época húmeda (Silas *et al.*, 2018). En el río Asana, en la estación AS-04, ubicada aguas abajo de la confluencia con la quebrada Millune, el factor 1 se correlaciona positivamente con la dureza, sólidos disueltos totales, sulfatos, aluminio, calcio, magnesio, manganeso, potasio y estroncio; dicha correlación es independiente del caudal. El factor 2 correlaciona de manera positiva el caudal, nitratos y potasio; esto, probablemente se asocia con actividades antrópicas; también se tiene una correlación negativa con bicarbonatos, hierro y sodio, lo cual indica que en época de lluvias la concentración de éstos disminuye por dilución; el factor 3 correlaciona de forma positiva con el oxígeno disuelto y el pH, y negativamente con la conductividad debido a que el incremento del pH reduce la disolución de metales del suelo, por lo que baja la conductividad; el incremento de oxígeno disuelto cuando baja el pH está relacionado con procesos fotosintéticos.

Liu, Lin y Kuo (2003) clasificaron las correlaciones como “fuertes”, “moderadas” y “débiles”, que corresponden al valor absoluto de las cargas mayores a 0.75, entre 0.75-0.50 y 0.50-0.30, respectivamente.

Conclusiones

La hidroquímica del río Asana y la quebrada Millune se caracterizan por tener aguas sulfatadas cálcicas; sin embargo, esta última presenta bajos valores de pH, altas concentraciones de aluminio, manganeso y sulfatos, al estar dominada por procesos de meteorización de rocas con minerales aluminosulfatados como la alunita, e incrementa la concentración de iones aluminio y manganeso en el río Asana en la confluencia. La capacidad amortiguadora del río Asana reduce la disolución de metales y favorece la alcalinidad de las aguas de la quebrada Altarani; además, neutraliza los bajos valores de pH de la quebrada Millune.

El deshielo de los nevados por efecto del cambio climático descubre suelos erosionables que aportan minerales al cauce de la quebrada Millune, siendo una razón por la que las reacciones en la cuenca hidrográfica son el principal mecanismo de control responsable de la variabilidad hidroquímica en la quebrada Millune; esta última, al desembocar en el río Asana, influye en su composición hidroquímica.

Los resultados obtenidos proporcionan una base científica sobre la variabilidad hidroquímica y los cambios ambientales en la cuenca Asana, que puede ser de utilidad en la gestión y toma de decisiones referente al

área de estudio, que permitirá una mejor comprensión de la dinámica hidroquímica y los mecanismos que la controlan para evaluar medidas de adaptación, alternativas de tratamiento del agua e identificación de las zonas de potencial contaminación natural.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación en Química, Toxicología y Biotecnología Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina (CIQTOBIA-UNALM) por su asesoría en la discusión de los resultados obtenidos en la investigación. Se agradecen las observaciones y sugerencias de los revisores anónimos que permitieron la mejora del artículo.

Referencias

- Acero, P., Hudson-Edwards, K. A., & Gale, J. D. (2015). Influence of pH and temperature on alunite dissolution: Rates, products and insights on mechanisms from atomistic simulation. *Chemical Geology*, 419, 1-9. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2015.10.018
- ANA, Autoridad Nacional del Agua del Perú. (2018). *Clasificación de los cuerpos de agua continentales superficiales, Lima, Perú*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2439>
- Ban, Y., Lei, T., Chen, C., & Liu, Z. (2016). Study on the facilities and procedures for meltwater erosion of thawed soil. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 142-147. DOI: 10.1016/j.iswcr.2016.04.003

- Cardona, A., & Hernández, N. (1995). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10(3), 71-90.
- Carrino, T. A., Crosta, A. P., Toledo, C. L. B., Silva, A. M., & Silva, J. L. (2015). Geology and hydrothermal alteration of the Chapi Chiara prospect and nearby targets, southern Peru, using ASTER data and reflectance spectroscopy. *Economic Geology*, 110(1), 73-90. DOI: 10.2113/econgeo.110.1.73
- De-Andrade, E. M., Palácio, H. A. Q., Souza, I. H., De-Oliveira-Leão, R. A., & Guerreiro, M. J. (2008). Land use effects in groundwater composition of an alluvial aquifer (Trussu River, Brazil) by multivariate techniques. *Environmental Research*, 106(2), 170-177. DOI: 10.1016/j.envres.2007.10.008
- Devic, G., Djordjevic, D., & Sakan, S. (2014). Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia. *Science of the Total Environment*, 468-469, 933-942. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.011
- Ece, Ö. I., Schroeder, P. A., Smilley, M. J., & Wampler, J. M. (2008). Acid-sulphate hydrothermal alteration of andesitic tuffs and genesis of halloysite and alunite deposits in the Biga Peninsula, Turkey. *Clay Minerals*, 43(02), 281-315. doi:10.1180/claymin.2008.043.2.10

- El-Alfy, M., Aref, L., Fathy, A., & Abdulaziz, A.-B. (2017). Assessing the hydrogeochemical processes affecting groundwater pollution in arid areas using an integration of geochemical equilibrium and multivariate statistical techniques. *Environmental Pollution*, 229(2017), 760-770. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.05.052
- Fritz, S. J. (1994). A survey of charge-balance errors on published analyses of potable ground and surface waters. *Ground Water*, 32(4), 539-546. doi:10.1111/j.1745-6584.1994.tb00888.x
- Gao, Z., Lin, Z., Niu, F., Luo, J., Liu, M., & Yin, G. (2017). Hydrochemistry and controlling mechanism of lakes in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China. *Geomorphology*, 297, 159–169. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.09.020
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090. DOI: 10.1126/science.170.3962.1088
- Grab, S., Linde, J., & De-Lemos, H. (2017). Some attributes of snow occurrence and snowmelt/sublimation rates in the Lesotho Highlands: environmental implications. *Water SA*, 43(2), 333-342.
- GRM, Gobierno Regional de Moquegua. (2011). *Estudio de diagnóstico y zonificación para fines de demarcación territorial de la provincia Mariscal Nieto*. Moquegua, Perú: Gobierno Regional de Moquegua.

- Hamzah, Z., Aris, A. Z., Ramli, M. F., Juahir, H., & Sheikhy-Narany, T. (2017). Groundwater quality assessment using integrated geochemical methods, multivariate statistical analysis, and geostatistical technique in shallow coastal aquifer of Terengganu, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(2). DOI: 10.1007/s12517-016-2828-5
- Han, G., & Liu, C. (2000). Hydrogeochemistry of Wujiang River water in GuiZhou province. *Carsologica Sinica*, 19, 35-43.
- Helena, B., Pardo, R., Veja, M., Barrado, E., Fernandez, J. M., & Fernandez, L. (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, 34(3), 807-816. DOI: 10.1016/s0043-1354(99)00225-0
- Jiang, J., Tang, S., Han, D., Fu, G., Solomatine, D., & Zheng, Y. (2020). A comprehensive review on the design and optimization of surface water quality monitoring networks. *Environmental Modelling & Software*, 104792. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104792
- Knight Piésold Consultores, S. A. (2008). *Modificación del estudio de impacto ambiental – Proyecto Quellaveco*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/ estudios/quellaveco/1.%20Texto.pdf>
- Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1-3), 77-89.

- Luque-Poma, G., Pari-Pinto, W., Dueñas-Olivera, K. L., Huamán-Nieto, M. (2020). Peligro geológico en la región. *Boletín Ingemmet. Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 75, 252. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2565>
- Montesinos, D. B., Cleef, A. M., & Sykora, K. V. (2012). Andean shrublands of Moquegua, South Peru: Prepuna plant communities. *Phytocoenologia*, 42(1-2), 29-55. DOI: 10.1127/0340-269x/2012/0042-0516
- Ng, W., Peña, N., & Acosta, H. (2019). Hidrogeología de la cuenca del río Ilo- Moquegua, Región Moquegua, INGEMMET. *Boletín Ingemmet. Serie H: Hidrogeología*, 6, 292.
- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621-2635. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.024
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological Survey*, 99-4259. Recuperado de <https://doi.org/10.3133/wri994259>
- Paterson, E., Goodman, B. A., & Farmer, V. C. (1991). The chemistry of aluminium, iron and manganese oxides in acid soils. *Soil Acidity*, 97-124. DOI: 10.1007/978-3-642-74442-6_5

- Qin, K., Liu, J., Yan, L., & Huang, H. (2019). Integrating ecosystem services flows into water security simulations in water scarce areas: Present and future. *Science of the Total Environment*, 670, 1037-1048. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.263
- Rau, P. (2017). *Precipitation runoff and water balance regimes variability along the Peruvian Pacific slope and coast: ENSO influence and sensitivity to hydroclimatic change* (tesis doctoral). Université Paul Sabatier-Toulouse III, ffNNT: 2017TOU30249ff, fftel-01925488ff
- Saarinen, T. S., & Kløve, B. (2012). Past and future seasonal variation in pH and metal concentrations in runoff from river basins on acid sulphate soils in Western Finland. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(11), 1614-1625. DOI: 10.1080/10934529.2012.680783
- Schreier, H., Erlebach, W., & Albright, L. (1980). Variations in water quality during winter in two Yukon rivers with emphasis on dissolved oxygen concentration. *Water Research*, 14(9), 1345-1351. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90195-5
- Silas, I., Wuana, R. A., & Augustine, A. U. (2018). Seasonal variation in water quality parameters of river Mkomon Kwande local government Area, Nigeria. *International Journal of Recent in Physics and Chemical Sciences*, 5(1), 42-62.
- Stiff, H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15-17. Recuperado de <https://doi.org/10.2118/951376-G>

- Thomas, J., Joseph, S., & Thirvikramji, K. P. (2015). Hydrochemical variations of a tropical mountain river system in a rain shadow region of the southern Western Ghats, Kerala, India. *Applied Geochemistry*, 63, 456-471.
- Vega, J, A., & Mustain, W. E. (2010). Effect of CO₂, HCO₃⁻ and CO₃⁻² on oxygen reduction in anion exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 55(5), 1638-1644. DOI: 10.1016/j.electacta.2009.10.041
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561. DOI: 10.1038/nature09440
- Villena-Chávez, J. A. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 304. Recuperado de <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- Villacorta, S., Fidel, L., & Zavala, B. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 393-399.
- Waterloo Hydrogeologic. (2020). *User's Manual AquaChem 9.0, Water Quality Analysis Software*. Waterloo, Canada: Waterloo Hydrogeologic.