

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍO
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO, CHILE



“ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN CAUSES DE ALTA MONTAÑA A PARTIR DE MEDICIONES DE TURBIDEZ”

Memoria de Título presentada por

BRYAM IGNACIO PÉREZ VALENCIA

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

INGENIERÍA CIVIL

Profesor Guía
RAÚL FLORES AUDIBERT

Junio de 2023



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**“ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN
CAUSES DE ALTA MONTAÑA A PARTIR DE MEDICIONES DE
TURBIDEZ”**

AUTOR:

BRYAM IGNACIO PÉREZ VALENCIA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera
de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Raúl Flores Audibert

Tomás Bolaño Ortiz

Lina Castro

Valparaíso, Chile, Junio de 2023

ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN CAUSES DE ALTA MONTAÑA A PARTIR DE MEDICIONES DE TURBIDEZ

Bryam Pérez Valencia¹, Raúl Flores Audibert¹.

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Resumen

La estimación del transporte de sedimentos es fundamental para cuantificar la capacidad erosiva de una región, o determinar la vida útil y/o planificación de mantención de las obras hidráulicas. Uno de los parámetros importantes a determinar para poder estimar el transporte de sedimentos es la concentración de sedimentos en suspensión (CSS). A pesar de la importancia de la CSS, tradicionalmente la medición de esta ha sido una tarea difícil producto de su variación temporal y espacial. En este documento se presentan 4 expresiones empíricas (de comportamientos lineales) que permiten determinar la CSS (en mg/L) a través de mediciones de turbidez (medida en FTU), a partir de un muestro de campo en los ríos Yeso y Juncalillo (ríos ubicados en la alta cordillera de la región Metropolitana y región de Valparaíso, respectivamente). Para determinar estas expresiones empíricas, se implementaron metodologías de laboratorio las que permitieron medir turbidez (mediante el uso de un turbidímetro AQUAlogger 310TY) y la CSS (mediante el “Método de prueba B – Filtración” asociado a la norma ASTM D 3977 – 97 Reap 19). Adicionalmente se realizó un análisis de variación del pH y la CE del agua en las zonas de estudio con y sin la presencia de sedimentos, el cual muestra que no existe una variación sustancial del pH ni de CE con la presencia de estos sedimentos.

Palabras claves: Concentración de sedimentos en suspensión (CSS), turbidez, expresiones empíricas.

1.- Introducción

El cambio climático al cual se le atribuye directa o indirectamente a la actividad humana es responsable de fenómenos asociados al aumento de temperaturas, por ende, al acelerado derretimiento de la nieve y de los glaciares (Naciones Unidas, 1992). La acumulación de nieve y su derretimiento es fundamental en el deslizamiento de tierra y erosión por lavado de láminas, los cuales dan como resultado rendimientos significativos de sedimentos (Barsch & Caine, 1984). Los ríos son alimentados principalmente por agua de deshielo de las altas montañas, y en estas situaciones una comprensión de la hidrológica y del transporte de sedimentos es esencial. El transporte de sedimentos es muy importante en cuencas con escasas precipitaciones y que dependen en gran medida de embalses, ya que estos dependen de escorrentías generadas en las zonas montañosas (López-Moreno & García-Ruiz, 2004), y estas a su vez contienen grandes cantidades de sedimentos, afectando así la vida útil de las obras hidráulicas y potencialmente la calidad del agua.

Los sedimentos en suspensión que transportan los sistemas fluviales pueden estar cargados de nutrientes y contaminantes, los cuales además de afectar las obras hidráulicas afectan ecosistemas acuáticos, y provoca una disminución de la calidad del agua (Mao & Carrillo, 2017). A pesar de su importancia en los procesos fluviales, la estimación de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) tradicionalmente ha sido una tarea compleja debido a su alta variabilidad temporal y espacial (Dyer, 1995). Para determinar la CSS se han utilizado instrumentos como trampas de sedimento, muestreadores mecánicos, botellas Niskin (Edwards et al., 1999), además de dispositivo ópticos (Optical Backscatter Sensor – OBS) (Kineke & Sternberg, 1992) y acústicos (Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP) (Restrepo & Pierini, 2012). En Chile por su parte existen estudios en donde se calcula la CSS utilizando expresiones adaptadas a cada situación (J. Salcedo-Castro et al., 2020; Méndez-Freire et al., 2022), pero por el momento no se dispone de datos representativos del transporte de

sedimentos en suspensión para ríos en la alta montaña, además, se sabe muy poco sobre la variabilidad estacional de los flujos de sedimentos y su relación con el derretimiento (Mao & Carrillo, 2017).

En este trabajo se buscará determinar una expresión empírica que permita obtener el valor de la CSS a partir de mediciones ópticas de turbidez, considerando muestreos periódicos en los ríos Yeso y Juncalillo, cercanos a los laboratorios portátiles equipados para monitorear glaciares del centro/sur de Chile NUNATAK 2 (en el Yeso) y NUNATAK 1 (en Portillo) respectivamente. Para la medición de turbidez se utilizará un AQUAlogger 310TY, instrumento capaz de medir la turbidez a través de sensores ópticos, mientras que para la medición de la CSS se implementará el “Método de prueba B” asociado a la D3977 (ASTM International, 1997), el cual requiere de filtrado, secado y pesado de muestras de agua en laboratorio. Adicionalmente se medirá el pH y la conductividad eléctrica (CE) pre y post filtrado del agua, para así determinar si los sedimentos presentes en el agua alteran el pH y la CE. Este estudio forma parte del proyecto del Concurso Anillo Regular de Investigación en Ciencia y/o Tecnología 2021 (Interactions between environmental compartments and their impact on the andean ecohydrosphere under climate change condition).

2.- Objetivos

2.1.- Objetivos Generales

Obtener una expresión empírica a partir de muestreo de campo en los ríos Yeso y Juncalillo que permita determinar la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) desde mediciones ópticas de turbidez.

2.2.- Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos abarcados en esta memoria, podemos encontrar los siguientes:

- 1.-** Proponer metodología de medición en laboratorio que permita determinar la concentración de sedimentos en suspensión y la turbidez de muestras obtenidas en los ríos Yeso y Juncalillo.
- 2.-** Medir turbidez y concentración de sedimentos en suspensión de las muestras obtenidas en los ríos Yeso y Juncalillo.
- 3.-** Obtener relación entre la turbidez y concentración de sedimentos en suspensión de las mediciones en los ríos Yeso y Juncalillo.

3.- Marco Conceptual

3.1.- Cambio Climático

Se define el “cambio climático” como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables (Naciones Unidas, 1992). El aumento general de temperaturas, fenómenos meteorológicos extremos, olas de calor, derretimientos de glaciares a un ritmo nunca visto, falta de cosechas, entre otras, son algunas de las consecuencias que ponen al cambio climático como prioridad a nivel global.

La temperatura es uno de los principales índices en que se mide el avance del cambio climático, la Figura 1 (NASA Goddard Institute for Space Studies, 2022) muestra esto, en donde se presenta la anomalía del ciclo estacional en los últimos 42 años, en la cual se observa un aumento significativo y progresivo de la temperatura en el tiempo.

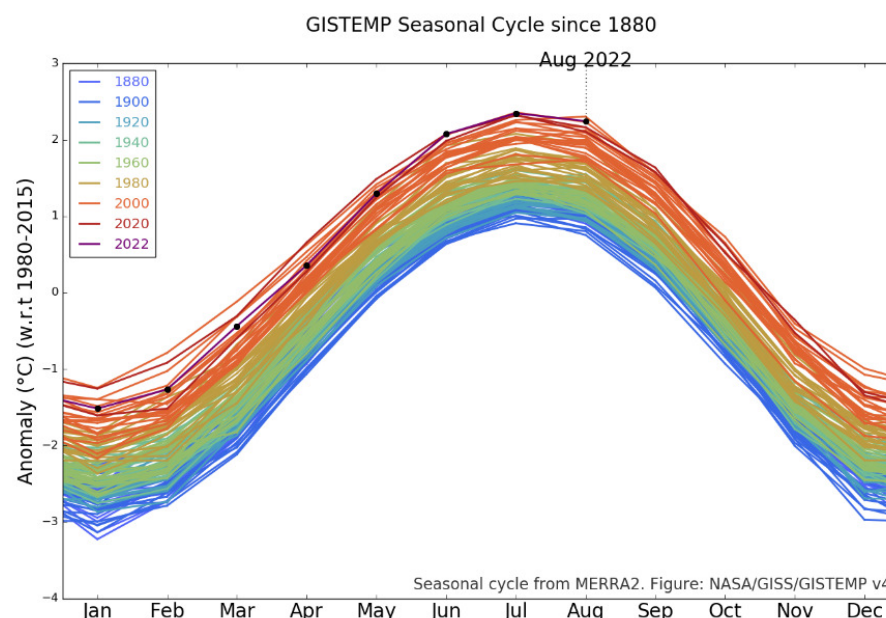


Figura 1.- Ciclo estacional de Merra2. Fuente: NASA/GISS/GISTEMP v4.

3.2.- Acumulación y derretimiento de nieve

Los glaciares son una masa de hielo que transforma el agua sólida (nieve, granizo o escarcha) en hielo y la restituye en forma de vapor (Francou & Pouyaud, 2008). Sus dos principales variables son la acumulación neta, que se define como la cantidad de nieve y hielo acumulado a lo largo de un año hidrológico, y la ablación, que es el resultado directo del balance energético a la superficie del glaciar (suma de la fusión y sublimación). Los glaciares desempeñan un papel clave en el sistema hidrológico, tanto en el amortiguamiento de los efectos naturales, como, de constituir reservorios y fuentes de agua dulce.

El aumento de las temperaturas producido por el cambio climático podría tener una gran influencia en las regiones montañosas (por ende, en los glaciares), puesto que en estas son zonas se registran las mayores nevadas, las cuales están condicionadas por las temperaturas presentes. Para determinar si la precipitación será líquida (lluvia) o sólida es necesario analizar la línea de nieve, la cual corresponde a la altitud desde donde empieza a nevar.

La línea de nieve se relaciona directamente con la temperatura, debido a esto, un aumento de la temperatura provocaría que la línea de nieve aumentara su altitud, por ende, a futuro se espera un cambio en la zona que presente una precipitación sólida (nevadas), provocando así un menor reservorio del recurso para la época estival.

El aumento de las temperaturas en las altas montañas y la elevación de la línea de nieve implica una modificación de ecosistemas y sus respectivos servicios ambientales, como los sistemas naturales de aprovisionamiento de agua, humedales, y paramos. Puesto que los glaciares constituyen un ente regulador de los caudales, su reducción acelerada, provocaría un aumento del caudal fluvial en invierno, un caudal primaveral máximo más temprano y, posiblemente, una disminución del caudal estival mínimo (Field et al., 2014).

La acumulación de nieve y su derretimiento es fundamental en el deslizamiento de tierra y erosión por lavado de láminas, que dan como resultado rendimientos significativos de sedimentos (Barsch & Caine, 1984), además, el derretimiento es la principal fuente de los ríos que provienen de la alta montaña, por lo que una comprensión de la hidrología y del transporte de sedimentos es esencial, esto último puesto que las cuencas con escasez de precipitación dependen de gran medida de embalses, los cuales pueden contener grandes cantidades de sedimentos, afectando su vida útil y potencialmente la calidad del agua (López-Moreno & García-Ruiz, 2004).

3.3.- Erosión y producción de sedimentos

El relieve del planeta es y ha sido modelado por los procesos de erosión, transporte, deposición y consolidación de sedimentos (Basile, 2018). Los sedimentos son aquellos fragmentos de rocas y minerales que se han generado por procesos de meteorización física y química que han actuado sobre rocas, los cuales son clasificados de acuerdo con su tamaño (grava, arena, limo y arcilla).

Los sedimentos producidos en una cuenca tienen su origen de la superficie de la cuenca, en el fondo y en las riberas de los cauces, además de los desechos industriales y urbanos.

El proceso de destrucción y transformación de las rocas, son principalmente causados por el agua y el aire. Se distinguen principalmente dos formas de destrucción y transformación: Desintegración mecánica y descomposición química (Flores et al., 1998).

La desintegración mecánica está asociada a cambios de temperatura (roca sufre por fatiga), congelación (roca sufre por tracción), y a efectos de flora y fauna, el producto final de esta desintegración en general son sedimentos de tipo grava y arenas, aunque también se pueden producir limos. Por otro lado, en la descomposición química es el principal agente, en la cual los procesos más destacados son la oxidación, reducción, hidratación, carbonatación y los efectos químicos de la vegetación, dando como resultado arcillas.

Los procesos de erosión debido al flujo hídrico se pueden dividir en procesos de erosión superficial (o también llamado erosión laminar) y en procesos de erosión lineal (o erosión canalizada). El flujo sobre el terreno es responsable de la erosión superficial, extendida sobre toda la superficie de la cuenca; mientras que, el flujo encauzado (drenaje controlado por características morfológicas bien definidas) es responsable de la erosión lineal (Basile, 2018).

La erosión superficial se produce por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo, el cual provoca la disgregación de las partículas, las cuales posteriormente son transportadas por el flujo mantiforme (agua se mueve en forma difusa sobre la superficie del terreno) sobre el terreno hasta ser depositado en alguna depresión del terreno o hasta alcanzar la red hidrográfica (sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado que asegura el drenaje de una cuenca).

La erosión lineal se vincula con la cantidad de sedimentos del lecho que el flujo hídrico es capaz de movilizar hacia aguas abajo. La capacidad de transporte depende de la tensión de corte sobre el fondo que ejerce el flujo hídrico encauzado y de las características sedimentológicas del cauce.

3.4.- Transporte de sedimentos

Los cauces naturales, además de transportar agua, puede transportar sedimentos (desde gravas a arcillas), este transporte es producido por el poder erosivo del cauce, transportando estas partículas desde su origen en la alta montaña hasta la orilla de la costa, el cual puede ir aumentando a lo largo de su camino. Este acarreo de sedimentos puede provocar una evolución en el cauce, la cual se tiene por una degradación o agradación del cauce.

Según la fuerza del flujo y el peso del sedimento, el transporte puede realizarse por arrastre (partículas más pesadas son arrastradas sin levantarse del suelo), saltación (pequeñas partículas se elevan y vuelven a caer, dando saltos de longitud y duración variables), suspensión (partículas muy finas que producto de la turbulencia del flujo no se depositan en el lecho por un tiempo prolongado) y disolución (material se transporta disuelto en el agua). La Figura 2 presenta un esquema de lo mencionado anteriormente.

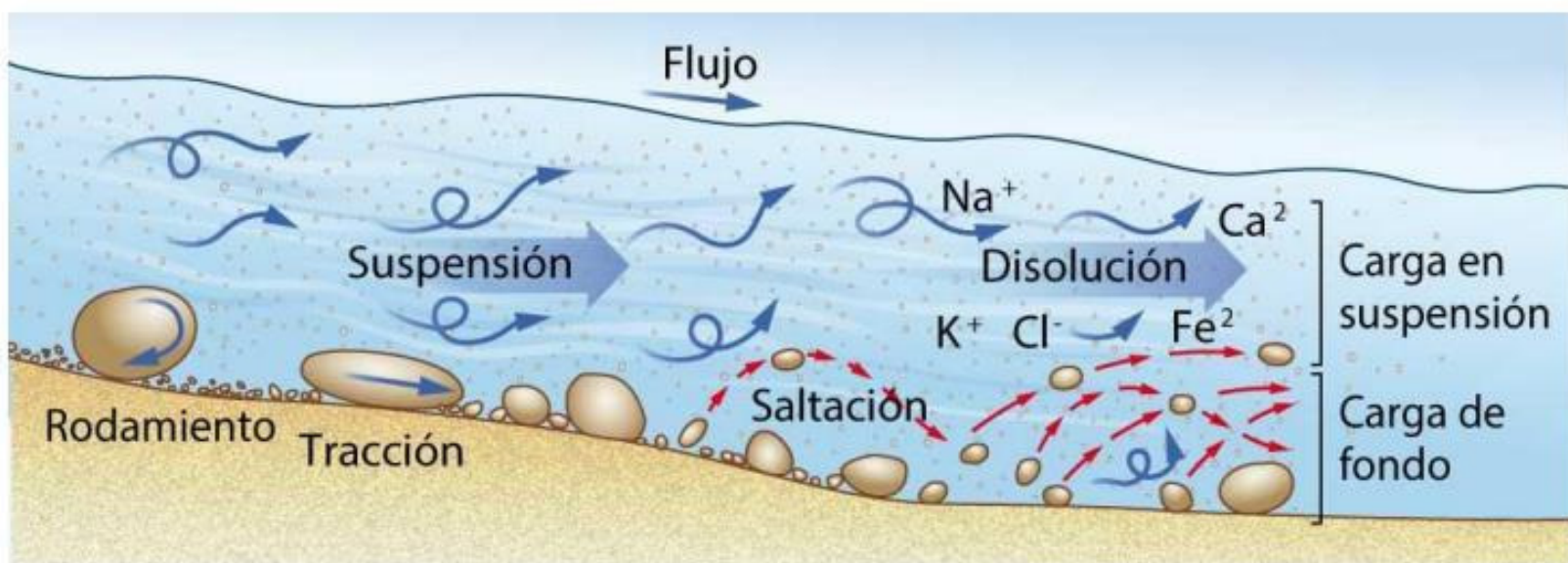


Figura 2.- Esquema de transporte de sedimentos.

Fuente: Geodinámica Externa - Oxford University Press España.

El transporte de sedimentos en el lecho puede ser dividido en transporte de fondo y transporte en suspensión. Los dos modos de transporte de material del lecho tienen influencia en los procesos de erosión y sedimentación de ríos aluviales.

El transporte de fondo es un modo de transporte en el cual las partículas (principalmente arenas y gravas) se mueven en el fondo o muy cerca de este, por arrastre, rodamiento o saltación (esto va a depender de la relación τ_0 vs τ_c). Por otro lado, el transporte en suspensión está conformado principalmente por arcillas, limos y arenas finas, las cuales son mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y solo se asientan cuando la corriente descarga en un pozo o lago (Hudson, 1997).

3.5.- Transporte en suspensión

El transporte de sedimentos en suspensión por unidad de ancho q_s puede ser calculado por la integración de la siguiente manera:

$$q_s = \int_a^h \bar{c}_s(z) \bar{u}(z) dz \quad (1)$$

Donde:

$\bar{c}_s(z)$: Perfil de concentración de sedimentos en suspensión.

$\bar{u}(z)$: Perfil de velocidades.

h : Profundidad de flujo.

a : Nivel de referencia cerca del lecho.

La resolución de esta no se puede realizar por integración analítica, sino por integración numérica. Para realizar la integración numérica es requerido determinar la distribución de velocidad en la vertical $\bar{u}(z)$, la cual puede determinarse a partir del perfil logarítmico o potencial. Por otra parte, el perfil de concentración $\bar{c}_s(z)$ se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{\bar{c}_s(z)}{\bar{c}_{sa}} = \left[\left(\frac{h-z}{z} \right) \left(\frac{a}{h-a} \right) \right]^{\alpha_r} \quad (2)$$

Donde:

$\overline{c_{sa}}$: Concentración correspondiente con el nivel de referencia a.

α_r : Parámetro de suspensión o número de Rouse (Rouse, 1937).

Alternativamente L.C van Rijn (1984) desarrolló el siguiente método:

$$q_s = U h F_c \overline{c_{sa}} \quad (3)$$

$$F_c = \frac{\left(\frac{a}{h}\right)^{Z'} - \left(\frac{a}{h}\right)^{1.2}}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^{Z'} - (1.2 - Z')} \quad (4)$$

Donde:

U : Velocidad media.

h : Profundidad de flujo.

$\overline{c_{sa}}$: Concentración correspondiente con el nivel de referencia a.

Z' : Parámetro de suspensión modificado.

Los sedimentos en suspensión que transportan los sistemas fluviales pueden estar cargados de nutrientes y contaminantes, los cuales pueden afectar los ecosistemas acuáticos, obras hidráulicas (como canales, bocatomas, embalses, entre otros), además de disminuir la calidad del agua (Mao & Carrillo, 2017).

3.6.- Medición de transporte en suspensión

El transporte en suspensión está conformado por el transporte en la columna de agua, del material del lecho y de la carga de lavado. En este tipo de transporte las partículas pierden contacto con el lecho y realizan trayectorias largas, comparables a la profundidad del flujo, sostenidas por las pulsaciones turbulentas de la corriente del flujo. La tendencia a la sedimentación de una partícula en suspensión es continuamente compensada por la acción difusiva del campo de flujo turbulento (Basile, 2018).

El perfil de concentración de sedimentos en suspensión (CSS) del material del lecho en la columna de agua no es uniforme, por lo que la CSS disminuye a medida que uno se mueve desde el fondo a la superficie.

Para el muestreo de transporte en suspensión se tienen dos posibilidades: muestreo rutinario, el cual consiste en una medición diaria superficial, en donde se toma una muestra en la sección de aforo y luego se lleva a laboratorio para analizarla y muestreo integrado, medición que en lo posible se realiza mensualmente y que abarca toda la columna de agua (Menares & López, 2012).

A pesar de la importancia en los procesos fluviales, la estimación de la CSS tradicionalmente ha sido una tarea compleja debido a su alta variabilidad temporal y espacial (Dyer, 1995). Para determinar la CSS se han utilizado instrumentos como turbidímetros, muestreos mecánicos (Edwards et al., 1999), además de técnicas sustitutas como dispositivos ópticos (Optical Backscatter Sensor – OBS) y dispositivos acústicos (Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP) (Restrepo & Pierini, 2012).

3.6.1.- Muestreo mecánico

Los instrumentos portátiles de tipo mecánico se usan para medir los sedimentos en suspensión, estos se pueden clasificar en muestreadores integradores en la vertical (a lo largo de la profundidad), puntuales (en un determinado punto en la vertical) e instantáneos puntuales (muestra instantánea de agua y sedimento en un determinado punto de la vertical).

Los muestreadores de concentración toman una muestra de agua y sedimentos en un cierto punto de la vertical o barriendo toda la profundidad, para luego ser llevada a laboratorio donde se determina la CSS.

Dentro de los requisitos que deben cumplir los muestreadores de sedimentos en suspensión se destacan los siguientes:

- La velocidad de entrada en la boquilla debe ser igual al valor local de la velocidad de flujo (muestreo isocinético).
- El contenedor de la muestra debe ser desmontable y adecuado para su transporte al laboratorio sin pérdida de la mezcla/sedimento muestreado.
- Debe poder llenarse sin problemas gradualmente, sin interrupción repentina de mezcla o ahogamiento.

A continuación, se presentan algunos muestreadores de sedimentos en suspensión:

- **Muestreador integrador puntual US P-61 A1** (FISP, 2002): Desarrollado por FISP, consiste en un cuerpo de forma hidrodinámica, de fundición de bronce, donde se aloja una botella de 950 ml, cuya función es contener la muestra (Figura 3).
- **Muestreador integrador en vertical US D-95** (FISP, 2000): Desarrollado por FISP, este instrumento consta de un contenedor de muestra tipo botella rígida capaz de recolectar muestras de hasta 1 litro (Figura 4).
- **Muestreo instantáneo puntual** (IWRC-SS, 1940): Recipiente cilíndrico, provisto en sus extremos de válvulas operadas mecánicamente desde la superficie para la toma de la muestra (Figura 5).
- **Botella de Delft** (van Rijn, 2007): Debe ser manipulado con sistemas de poleas, su funcionamiento se basa en el principio de flujo pasante (agua entra por la boquilla de admisión y sale por la parte trasera) (Figura 6).

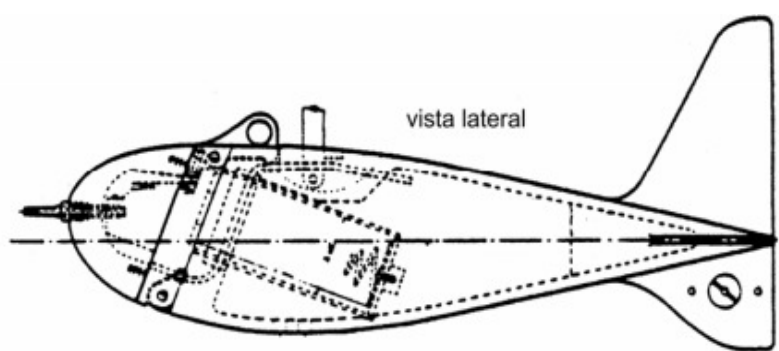


Figura 3.- Muestreador US P-61 A1.

Fuente: FISP, 2002.

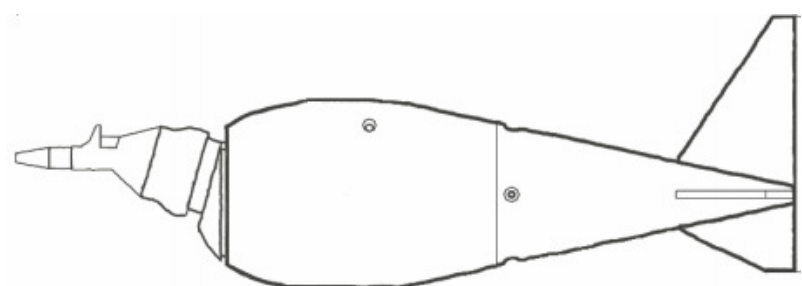


Figura 4.- Muestreador US D-95.

Fuente: FISP, 2000.

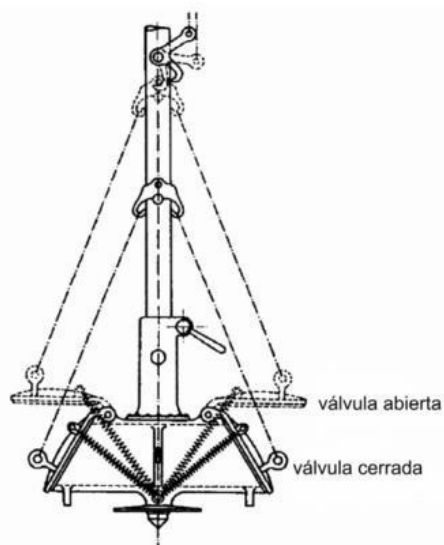


Figura 5.- Muestreador instantáneo puntual horizontal.
Fuente: IWRC-SS, 1940.

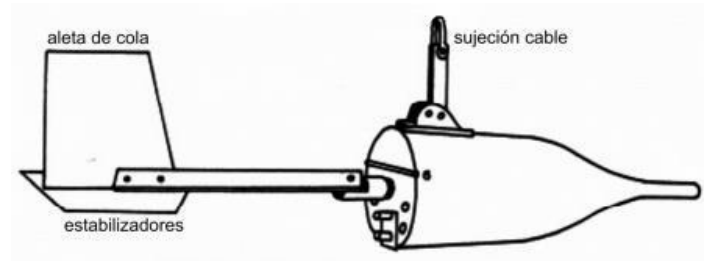


Figura 6.- Muestreador de botella de Delft.
Fuente: Van Rijn, 2007.

3.6.2.- Métodos de laboratorio para determinar CSS

El “Método de prueba estándar para determinación de la concentración de sedimentos en muestras de agua” D3977 (ASTM International, 1997) presenta tres métodos para determinar la CSS en laboratorio:

- **Método de prueba A – Evaporación:** El método de prueba A solo se puede usar en sedimentos que sedimentan dentro del tiempo de almacenamiento asignado de las muestras, que generalmente oscila entre unos pocos días y unas pocas semanas. Este método de prueba es aplicable a muestras que van desde 0,2 a 20 [L] en volumen, desde 5 a 550.000 [mg/L] en concentración de sedimentos, y que tienen menos de 35.000 [mg/L] en concentración de sólidos disueltos. Una vez que el sedimento se haya asentado, la mayor parte del agua sobrante se vierte o se extrae con sifón. Se mide el volumen de la mezcla de agua y sedimento que queda para que luego se pueda aplicar una corrección de sólidos disueltos. A continuación, el sedimento se seca y se pesa.
- **Método de prueba B – Filtración:** El método de prueba B solo se puede usar en muestras que contengan concentraciones de arena inferiores a 10.000 [ppm] y concentraciones de arcilla inferiores a 200 [ppm]. El sedimento no necesita ser sedimentable porque se usan filtros para separar el agua del sedimento. No se requieren factores de corrección para sólidos disueltos. Aunque una muestra de alta concentración puede filtrarse lentamente, los usuarios no deben dividir la muestra y usar dos o más filtros. En su lugar, toda la muestra debe filtrarse a través de un disco. La muestra, que consiste en agua de río, sedimentos y sólidos disueltos, se pesa y luego se filtra a través de un disco de fibra de vidrio.
- **Método de prueba C – Filtración de tamizado húmedo:** El método de prueba C se puede usar si se requieren dos valores de concentración: uno para partículas del tamaño de arena y otro para la combinación de partículas del tamaño de limo y arcilla. La fracción limo-arcilla no necesita ser sedimentable. Este método de prueba es útil cuando se deben recolectar muestras grandes en el campo, pero solo se pueden enviar al laboratorio submuestras pequeñas, generalmente de 300 a 500 [ml]. La muestra se vierte en un tamiz con aberturas de 62 o 63 [µm]. El análisis incluye toda la fracción gruesa, pero solo una pequeña alícuota medida de la fracción fina. El tamizado y la extracción de alícuotas se pueden realizar en el sitio de muestreo o en el laboratorio.

3.6.3.- Tecnología sustituta para medir la CSS

Estas tecnologías sustitutas se caracterizan por realizar mediciones indirectas, continuas y no invasivas del sedimento en suspensión a través de sensores ópticos o acústicos.

Producto de los sedimentos en suspensión presentes en el agua, estos alteran la transparencia de esta, por ende, aumenta la turbidez del agua, cambiando así la capacidad de absorción de la luz, además de modificar la transmisión de ondas sonoras. Estos efectos pueden ser utilizados para medir la CSS (Basile, 2018).

3.6.3.1.- Sensores ópticos de retrodispersión – OBS

Estos sensores de retrodispersión (Optical Backscatter Sensor) también llamados turbidímetros, son instrumentos que miden la turbidez mediante la detección de la luz infrarroja dispersada por las partículas en suspensión. La respuesta del turbidímetro depende en gran medida del tamaño, la composición y la forma de las partículas en suspensión. Debido a esto, cada sensor debe ser calibrado usando los datos del sitio de interés (Basile, 2018).

La CSS se define en términos de volumen por unidad de volumen (m^3/m^3) o peso de sedimentos por unidad de volumen de agua (g/m^3). En cambio, la turbidez es una propiedad óptica definida por la desviación de una luz incidente y se define en términos de Unidades de Turbidez Nefelométricas (NTU) o Unidad de Turbidez de Formación (FTU).

Las ventajas de usar un sensor óptico, en lugar del muestreo de agua, para medir la CSS son muchas, entre ellas el monitoreo continuo, la visualización en tiempo real y las mediciones simultáneas con medidores de flujo. Sin embargo, la mayoría de los sensores ópticos no se pueden utilizar con éxito en aguas muy turbias y son extremadamente susceptibles a los efectos de las características de las partículas (Kineke & Sternberg, 1992).

3.6.3.2.- Sensores ópticos de difracción láser – LISST

Los sensores ópticos de difracción láser utilizan el principio de dispersión de la luz medida en ángulos de desviación pequeños, para así determinar la distribución de tamaños de partículas y concentración volumétrica de sedimentos en suspensión. Producto que estos instrumentos asocian la dispersión de la luz que generan esferas de diámetro mayor a la longitud de onda utilizada con la difracción de aperturas igual tamaño, cualquier alejamiento de forma esférica produce cambios en las distribuciones y concentraciones.

Instrumentos como LISST-SL y LISST-STX miden simultáneamente la transmisión óptica, la distribución del tamaño de las partículas, la concentración de sedimentos en suspensión, la profundidad y la temperatura (Agrawal et al., 2011). Por otro lado, el dispositivo LISST-SL también mide la velocidad del flujo mediante un sensor de velocidad incorporado (Filippa et al., 2011).

3.6.3.3.- Sensores perfiladores de retrodispersión – ADCP

Este tipo de tecnología utiliza el efecto Doppler, que se verifica cuando un transductor de sonar de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) emite un pulso corto de energía acústica, el cual se propaga a través del agua y es reflejado por las partículas que se encuentran en suspensión moviéndose con la velocidad del agua. Una parte de la energía acústica reflejada vuelve hacia los transductores, donde es registrada, ya que los mismos actúan también como receptores de sonido (Basile, 2018).

El procedimiento para obtener valores de CSS a partir de la señal de retro dispersión acústica registrada por el sensor se realiza generalmente utilizando funciones semiempíricas entre cambios en la señal del instrumento y las mediciones directas con muestreadores tradicionales.

La retrodispersión acústica es la cantidad de sonido dispersado que recibe de nuevo el transductor después de la emisión del eco, por otro lado, la atenuación acústica inducida por los sedimentos es la cantidad de sonido dispersado en otras direcciones y absorbido por los sedimentos. Estos pueden ser

medidos por un ADCP y su dependencia de la concentración permitirá discriminar la carga de lavado (limo y arcilla) de la arena en suspensión (Wright et al., 2010).

Los ADCP se están convirtiendo en el estándar para medir la velocidad de la corriente tanto en ubicaciones estacionarias como en sensores móviles a bordo de barcos. Durante la última década ha habido una mayor actividad en el desarrollo de métodos para medir la CSS utilizando la intensidad de la retrodispersión acústica de dichos sistemas de perfiles de corriente acústica. En donde todos los tipos de perfiles de corriente acústica registran datos de corriente en 3D, pero también miden la intensidad del eco de retorno, que es proporcional a la cantidad de partículas de retrodispersión presentes en la columna de agua. Si la mayoría de las partículas de retrodispersión son de naturaleza sedimentaria, la intensidad acústica se puede utilizar como indicador de CSS total (Kim & Voulgaris, 2003).

3.7.- Calidad del agua

3.7.1.- Turbidez

La turbidez es un término que indica la falta de transparencia de un líquido, debido principalmente a la presencia de partículas que se encuentran en suspensión. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos en suspensión presente, mayor será la turbidez.

La turbidez del agua se genera por la presencia de partículas en suspensión. La velocidad de sedimentación de partículas grandes (mayores al micrón de diámetro) es alta lo cual sedimentan espontáneamente, no así las partículas pequeñas las cuales tienen velocidades de sedimentaciones muy bajas (Marcó et al., 2004).

La medición de turbidez es una buena forma para predecir las calidades del agua. La turbidez se mide en términos de Unidades de Turbidez Nefelométricas (NTU) o Unidad de Turbidez de Formación (FTU). El instrumento que mide normalmente la turbidez se llama turbidímetro, el cual es capaz de medir la intensidad que posee la luz que ha sido dispersada a unos 90°, cuando pasa por la muestra de agua, un rayo de luz. Aunque las dos escalas miden la turbidez de manera diferente, tienen esencialmente el mismo valor (1 [NTU] = 1 [FTU]).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en sus guías para la calidad del agua de consumo humano (OMS, 2011) indica la turbidez debe mantenerse idealmente por debajo de 1 [NTU] para así propiciar una desinfección eficaz, pero en ningún caso puede ser superior a 5 [NTU], para que el agua pueda ser utilizada para el consumo humano.

3.7.2.- Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de un cuerpo que permite el paso de corriente eléctrica, además esta es inversa a la resistencia. La unidad de medida utilizada comúnmente es el micro Siemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

El agua pura es mala conductora de la corriente eléctrica, mientras que las soluciones acuosas presentan buena conductividad, la cual está determinada por la presencia de sales iónicas disueltas. Así, la conductividad de las soluciones resulta ser directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos en el agua.

Las medidas de CE en el agua se utilizan como parámetros para evaluar la cantidad de sólidos disueltos totales (TDS, por su sigla en inglés) y la dureza del agua. A continuación, se detalla los valores de conductividad para los distintos tipos de aguas, referidos a la temperatura estándar de 25 [°C] (López & Máximo, 2014).

- Agua pura : 0.055 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
- Agua destilada : 0.5 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
- Agua de montaña : 1.0 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
- Agua para uso doméstico : 500 a 800 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
- Máx. para agua potable : 10 [mS/cm]
- Agua de mar : 52 [mS/cm]
- Agua salobre : 100 [mS/cm]

3.7.3.- pH en el agua

El pH es una de las pruebas más comunes para conocer parte de la calidad del agua. El pH indica la acidez o alcalinidad, las mediciones de pH se ejecutan en una escala de 0 a 14, considerando el 7.0 neutro. Las mediciones de pH sobre 7.0 se consideran bases o alcalinos, mientras que los valores bajo 7.0 se consideran ácidas (Zamora, 2009).

La escala de pH es logarítmica, por lo que cada cambio de la unidad del pH en realidad representa un cambio de diez veces en la acidez.

El rango normal de pH en agua superficial es de 6.5 a 8.5 y para aguas subterráneas 6 a 8.5. En general, agua con valores de pH menores a 6.5 es considerada ácida y corrosiva, por lo tanto, el agua podría disolver iones metálicos, tales como: hierro, manganeso, cobre, plomo, zinc, por ende, accesorios de plomería y tuberías. Un agua con un pH superior a 8.5 indica alcalinidad, por lo que podría presentar problemas de incrustaciones por dureza, pero esto no representa riesgo de salud (Sigler & Bauder, 2017).

4.- Metodología

En esta sección se detalla el procedimiento a seguir para realizar las mediciones de las variables de interés (CSS, turbidez, CE y pH) en este estudio.

El muestreo se realiza a través de un muestreador instantáneo puntual, es decir, se toma la muestra instantánea de agua y sedimentos (con un envase plástico) en un determinado punto en la vertical, de tal forma que sea lo más representativo a las condiciones del flujo. Para el procedimiento, los envases fueron sumergidos directamente en el embalse o río, se enjuagaron tres veces con agua y finalmente se llenan. Estas muestras deben ser etiquetadas señalando ubicación y fecha de muestreo, además, el envase debe ser pesado y registrado como $P_{\text{recipiente}}$ con una precisión de 0.01 [g] antes de realizar el muestreo.

Las muestras se deben mantener congeladas y almacenadas en un lugar fresco, y oscuro hasta el día de análisis, para así minimizar el crecimiento microbiológico y de algas.

Las muestras analizadas principalmente son obtenidas durante los años 2021 y 2022, pero existen un par de muestras del 2020.

4.1.- Medición de turbidez

Las mediciones de turbidez se realizarán mediante la detección de la luz infrarroja dispersada por las partículas en suspensión de las muestras, con el uso de un AQUAlogger 310TY (Aquatec Group Ltd, 2022), el cual entrega los resultados en FTU. A continuación, se detallan los pasos para realizar las mediciones:

1. Descongelar las muestras, para luego verter el contenido agua-sedimentos a un vaso precipitado.
2. Incorporar un agitador magnético, este con el fin de que las partículas se mantengan en suspensión y emulen el flujo natural.
3. Medir con el instrumento turbidez, registrándola cada 30 [s], al menos 3 veces.
4. Calcular el promedio y la desviación estándar de las mediciones. Registrar el promedio como Turbidez.

4.2.- Medición de la CSS

Para medir la CSS se usará el ensayo de laboratorio “Método de prueba B” asociado a la norma ASTM D 3977 – 97 Reap 19 (ASTM International, 1997), el cual consta de filtrar una muestra de agua con sedimentos utilizando una bomba. A continuación, se detallan los pasos a seguir.

1. Pesar filtro de papel (se usarán filtros circulares de grado 40 y de 125 [mm] de diámetro), ya acondicionados previamente en la sala de balanzas por al menos 24 [hr]. Registrar como P_{filtro} con una precisión de 0.0001 [g].
2. Se pesa la muestra de agua más sedimentos (con el envase plástico). Registrar como $P_{\text{muestra-bruto}}$ con una precisión de 0.01 [g].
3. Filtrar la muestra en el sistema de filtrado (Figura 7) el cual está compuesto por: Embudo de vidrio y porcelana, vaso precipitado, matraz de Erlenmeyer, manguera, y de una bomba de vacío; mientras se aplica vacío a través de la bomba (esto con el fin de acelerar el filtrado). Enjuagar con agua Mili-Q las superficies internas del recipiente para así lograr una completa transferencia. Si el agua filtrada sigue con turbidez, se debe volver a filtrar a través del filtro una segunda vez y posiblemente una tercera vez si es necesario.
4. Cuando se complete la filtración, se debe llevar el filtro de papel con sedimentos a una campana de extracción (para este estudio se usará la ESCO laminar Flow cabinet) por al menos 5 [hr], esto con el fin de extraer la totalidad del agua restante en el filtro.
5. Cuando el filtro este completamente seco, se debe llevar a la sala de balanza para acondicionar por 24 [hr]. Luego de las 24 [hr] se debe pesar el filtro con sedimentos registrándolo como $P_{\text{filtro-bruto}}$ con una precisión de 0.0001 [g].
6. Finalmente utilizando las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 se obtiene el valor de CSS.

$$P_{\text{muestra-neto}} = P_{\text{muestra-bruto}} - P_{\text{recipiente}} \quad (5)$$

$$P_{\text{sedimento-neto}} = P_{\text{filtro-bruto}} - P_{\text{filtro}} \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{P_{\text{sedimento-neto}}}{P_{\text{muestra-neto}}} * 10^6 \quad (7)$$

$$CSS = C_1 * \frac{1}{1 - C_1 * 622 * 10^{-9}} \quad (8)$$

Con $P_{\text{muestra-bruto}}$, $P_{\text{recipiente}}$, $P_{\text{muestra-neto}}$, $P_{\text{filtro-bruto}}$, P_{filtro} y $P_{\text{sedimento-neto}}$ en [g], C_1 en [ppm] y CSS en [mg/L]. Es posible considerar $CSS = C_1$.



Figura 7.- Sistema de Filtrado – Método de prueba B.

4.3.- Medición de pH y CE

La medición de pH y CE se debe realizar antes y después del filtrado, esto con el fin de determinar si los sedimentos presentes cambian la calidad del agua. La primera medición se realiza después de la medición de turbidez, para ello se sacará una pequeña muestra de no más de 100 [ml] (esta debe ser incorporada nuevamente después de la medición), y la segunda se realiza posterior al filtrado total de la muestra.

Para realizar la medición del pH y de la CE de las muestras, ambos electrodos deben ser calibrados. La calibración del electrodo de pH se realiza con las soluciones de pH 4,01 y 7,01, ambos estándares NIST mientras para el electrodo de CE la calibración se realiza con el estándar NIST de conductividad de 1413 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (HANNA INSTRUMENTS, 2022).

Es importante destacar que la calibración instrumental se realiza cada vez que se enciende el equipo y que cada 10 muestras se mide un estándar para verificar su funcionamiento.

5.- Área de estudio

5.1.- El Yeso

El área de estudio está localizada en la subcuenca Río Yeso (cuenca del Río Maipo), la cual pertenece a la Región Metropolitana de Santiago de Chile, específicamente en la subcuenca Embalse El Yeso, esta tiene una altura entre 1.521 y 6.085 [msnm], y cubre un área aproximada de 350 [km²] en los Andes Centrales de Chile (Figura 8). La Figura 9 presenta la ubicación de los puntos de muestreo en el borde inferior del embalse El Yeso, los cuales serán denominadas como NNTK2 – S1, NNTK2 – S2, NNTK2 – S3, mientras que la Figura 10 presenta el punto de muestreo aguas arriba del embalse El Yeso, específicamente en el Puente Las Pionas, este punto será denominado NNTK2 – Aforo (o similares).

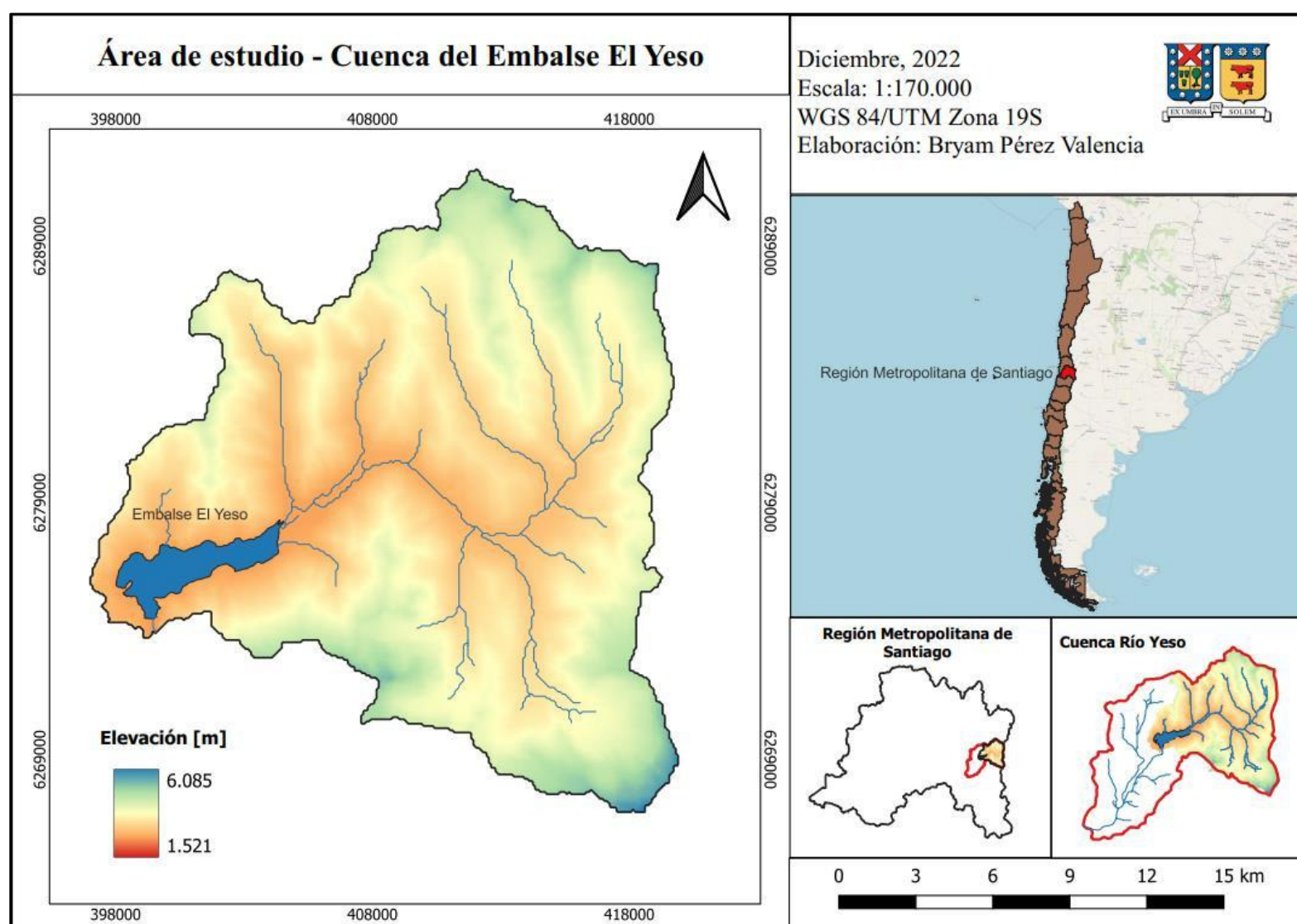


Figura 8.- Área de estudio - El Yeso. Fuente: Elaboración propia.

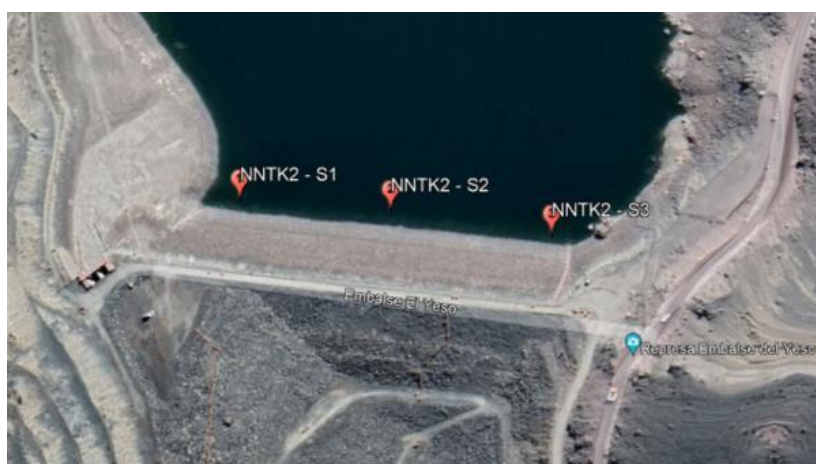


Figura 9.- Zonas de muestreo - Embalse El Yeso.
Fuente: Google Earth.



Figura 10.- Zona de muestreo - Aforo El Yeso.
Fuente: Google Earth.

5.2.- Juncalillo

El área de estudio está localizada en la subcuenca Río Juncalillo (cuenca del Río Aconcagua), la cual pertenece a la Región Valparaíso, específicamente en la subcuenca Estero Juncalillo, tiene una altura entre 1.205 y 4.823 [m], y cubre un área aproximada de 75 [km²] en los Andes Centrales de Chile (Figura 11). La Figura 12 presenta la ubicación de los puntos de muestreo al costado de la escuela de montaña, los cuales serán denominadas como NNTK1 – S1, NNTK1 – S2.

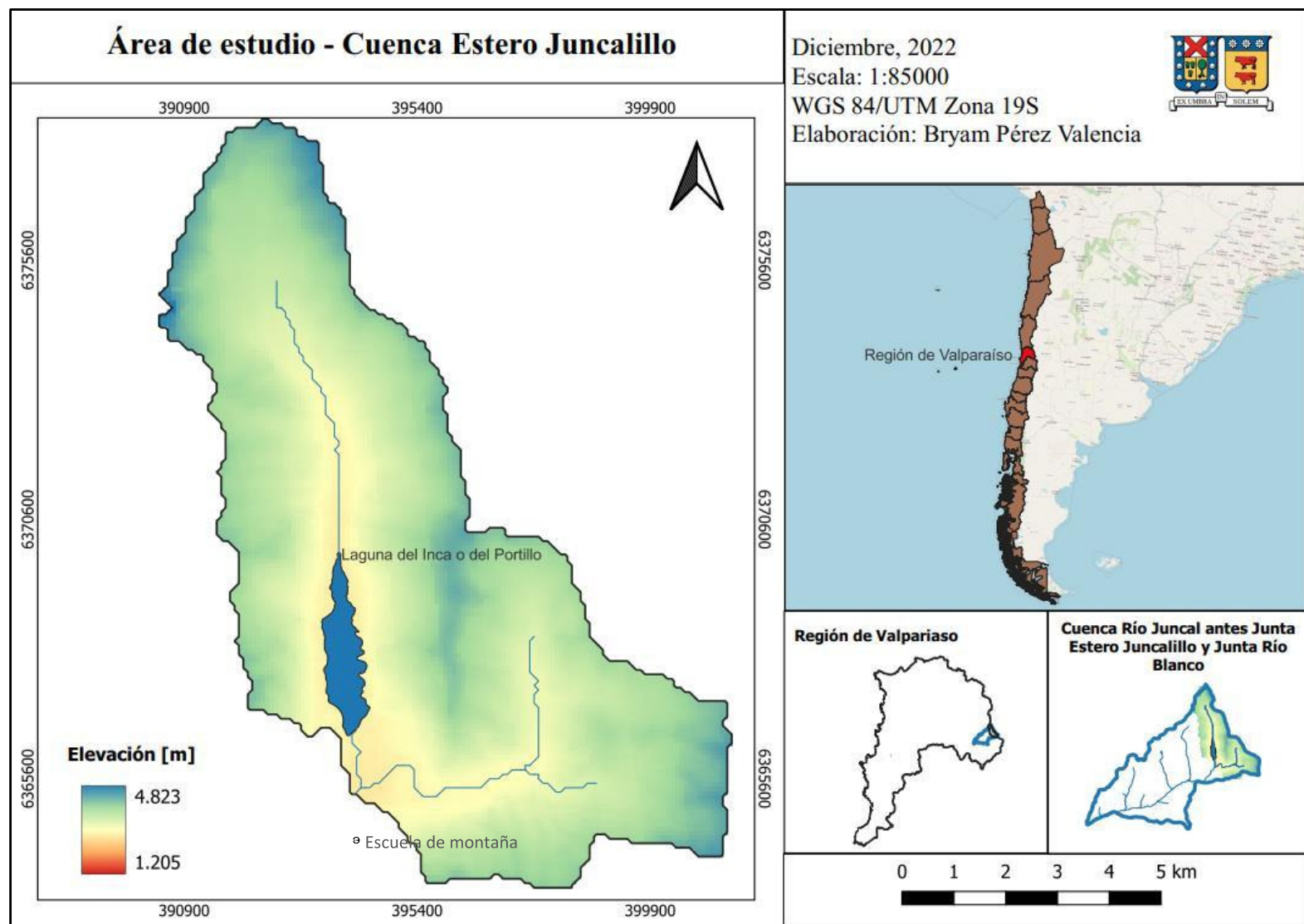


Figura 11.- Área de estudio - Juncalillo. Fuente: Elaboración propia.



Figura 12.- Zona de muestreo - Río Juncalillo. Fuente: Google Earth.

6.- Resultados

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones realizadas para cada una de las variables de interés (turbidez, CSS, pH y CE), estas se presentarán en primera instancia separadas según el área de estudio y posteriormente se realiza un análisis con la totalidad de las mediciones (esto para ver el comportamiento general de la correlación turbidez – CSS).

6.1.- El Yeso

En esta sección se presentarán los resultados de las variables de interés, para ello se dividirá en 2 zonas, mediciones realizadas en el embalse y en el aforo el aforo.

6.1.1.- Embalse El Yeso

La Tabla 1 presenta los resultados de las mediciones de turbidez y CSS para las muestras obtenidas en el Embalse El Yeso (NNTK2 – S1R5 – 1, NNTK2 – S2R5 – 1, NNTK2 – S3R5 – 1).

Tabla 1.- Mediciones Embalse El Yeso – El Yeso

Ubicación	Fecha	Turbidez [FTU]	CSS [mg/L]
NNTK2 - S2 R5-1	07-06-2021	1.78	9.48
NNTK2 - S1 R5-1	07-06-2021	3.19	10.74
NNTK2 - S3 R5-1	10-06-2021	5.32	12.36
NNTK2 - S1 R5-1	10-06-2021	4.52	10.22
NNTK2 - S2 R5-1	21-07-2021	3.10	9.85
NNTK2 - S1 R5-1	21-07-2021	10.74	18.38
NNTK2 - S3 R5-1	07-12-2021	1.25	6.41
NNTK2 - S1 R5-1	05-01-2022	2.60	7.96
NNTK2 - S1 R5-1	26-01-2022	7.56	14.70
NNTK2 - S1 R5-1	08-03-2022	15.49	18.38
NNTK2 - S1 R5-1	07-04-2022	1.88	6.41
NNTK2 - S1 R5-1	05-05-2022	2.90	8.97
NNTK2 - S1 R5-1	07-06-2022	5.67	10.22
NNTK2 - S1 R5-1	05-07-2022	6.04	7.50
NNTK2 - S1 R5-1	03-08-2022	10.34	22.18
NNTK2 - S1 R5-1	25-08-2022	5.07	9.32
NNTK2 - S1 R5-1	20-10-2022	6.14	12.23
NNTK2 - S1 R5-1	21-11-2022	4.86	7.30
NNTK2 - S1 R5-1	11-12-2022	7.43	9.05

Para más detalles respecto a las mediciones de turbidez y de los parámetros para determinar la CSS revisar el Anexo 1 y Anexo 4 respectivamente.

La Figura 13 presenta la correlación entre la CSS y la turbidez de las mediciones provenientes del Embalse – El Yeso. De igual forma, la Ecuación 9 presenta la correlación lineal de estas variables.

$$CSS = 0.9985 * T + 5.5752 \quad (9)$$

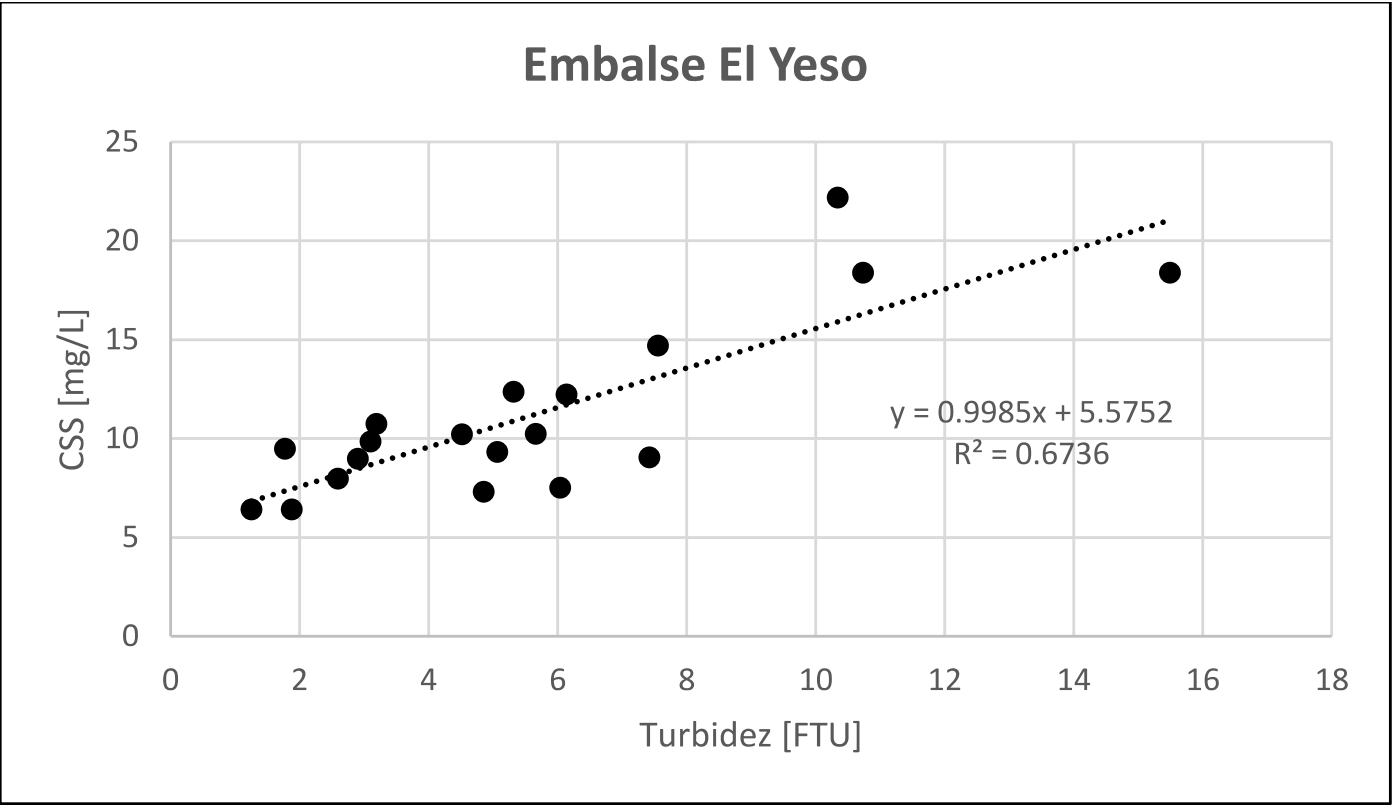


Figura 13.- Correlación Embalse El Yeso – El Yeso

Por otro lado, la Figura 14 presenta gráficamente la temporalidad asociada a la CSS para las muestras obtenidas del Embalse.

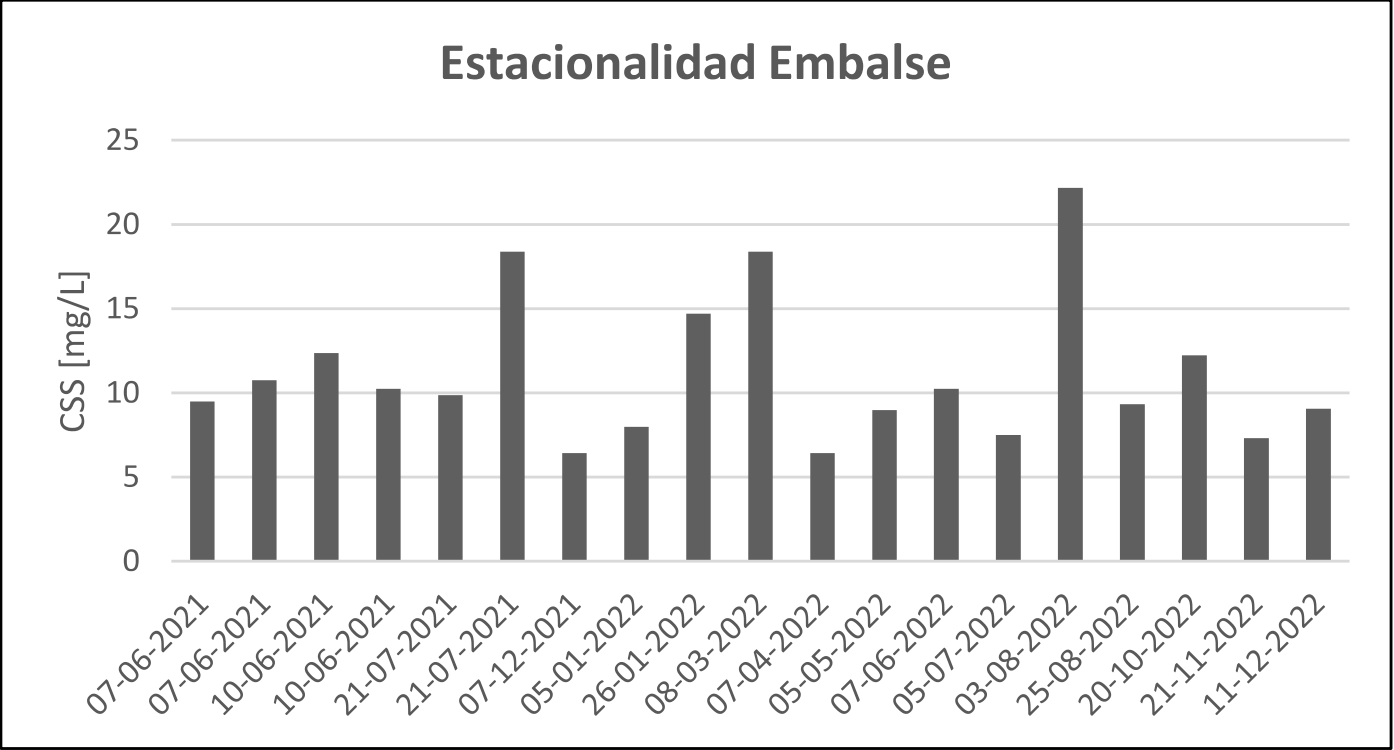


Figura 14.- Temporalidad CSS Embalse El Yeso – El Yeso

6.1.2.- Aforo

La Tabla 2 presenta los resultados asociados a las mediciones de turbidez y CSS para las muestras obtenidas en el aforo del río Yeso.

Tabla 2.- Resultados de medición Aforo El Yeso – El Yeso

Ubicación	Fecha	Turbidez [FTU]	CSS [mg/L]
NNTK2 - S_Y_Puente-R5-1	05-01-2022	187.41	642.85
NNTK2 - S_Y_Rojo-R5-1	05-01-2022	16.86	36.59
NNTK2 SY-DGA R5-1	05-01-2022	273.65	1451.71
AFORO -RF-R1-2	26-01-2022	310.76	748.08
AFORO -RF-R1-2	26-01-2022	178.50	794.20

Para más detalles respecto a las mediciones de turbidez y de los parámetros para determinar la CSS revisar el Anexo 2 y Anexo 5 respectivamente.

Por otro lado, la Figura 15 presenta la correlación entre la CSS y la turbidez asociada a los resultados anteriores. Además, la Ecuación 10 presenta la correlación lineal de estas variables.

$$CSS = 3.525 * T + 52.831 \quad (10)$$

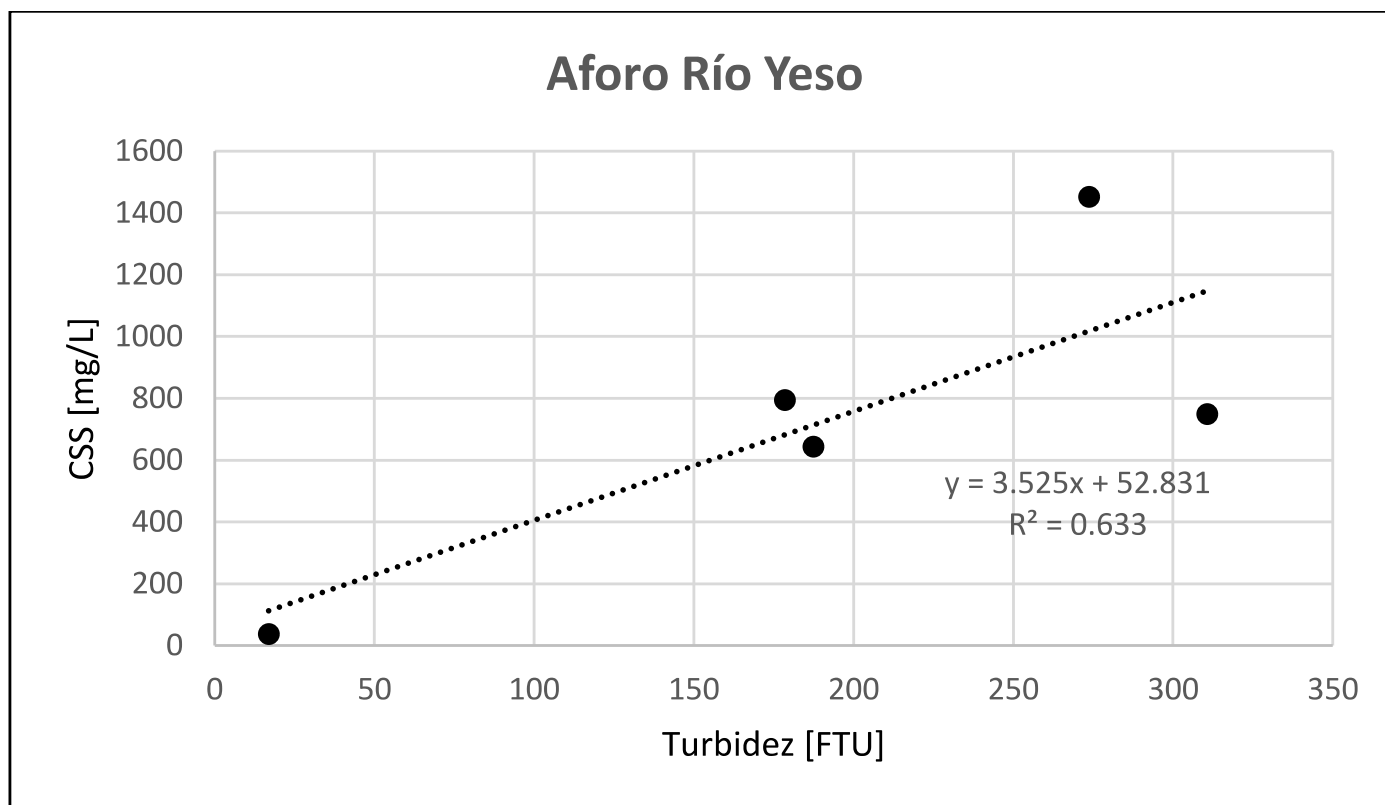


Figura 15.- Correlación Aforo río Yeso – El Yeso

Adicionalmente, en la Figura 17 se presenta gráficamente la temporalidad de la CSS para las muestras obtenidas en el aforo del río Yeso.

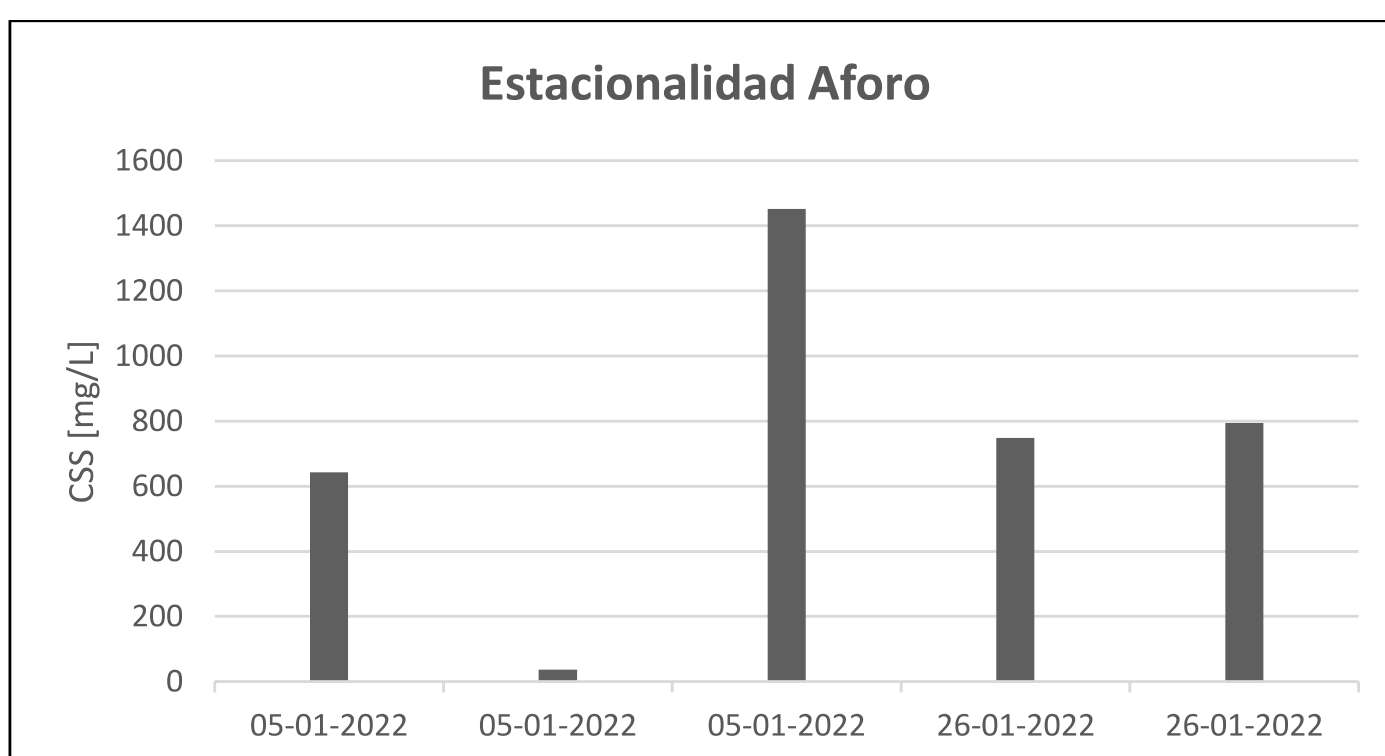


Figura 16.- Temporalidad CSS en aforo – El Yeso

6.1.3.- Mediciones de pH y CE

Por otra parte, la Tabla 3 presenta los resultados asociados a las mediciones de pH y CE antes y después del filtrado de las muestras tomadas en el río Yeso.

Tabla 3.- Resultados de medición de pH y CE – El Yeso

Fecha	Ubicación	pH		Conductividad [µS/cm]	
		Pre Filtrado	Post Filtrado	Pre Filtrado	Post Filtrado
10-06-2021	NNTK2 - S3 R5-1	7.37	7.61	1274	1344
10-06-2021	NNTK2 - S1 R5-1	7.17	7.13	1418	1404
21-07-2021	NNTK2 - S2 R5-1	7.52	7.45	1362	1398
07-12-2021	NNTK2 - S3 R5-1	7.44	7.36	1582	1529
05-01-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.75	7.67	1567	1547
05-01-2022	NNTK2 - S_Y_Puente-R5-1	7.58	7.49	1504	1450
05-01-2022	NNTK2 - S_Y_Rojo-R5-1	7.65	7.40	1658	1711
26-01-2022	AFORO - RF R1-2	7.50	7.55	1347	1339
08-03-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.40	7.37	1320	1309
07-04-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.59	7.75	1395	1375
05-05-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.82	7.58	1382	1407
05-07-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.51	7.67	1180	1205
03-08-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.34	7.40	1361	1307
25-08-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.65	7.64	1410	1401
20-10-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.52	7.66	1310	1293
21-11-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.64	7.70	1221	1218
11-12-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.55	7.54	1237	1211

Así mismo, la Figura 17 y la Figura 18 presentan una comparativa grafica entre los resultados pre y post filtrado del pH y de la CE respectivamente.

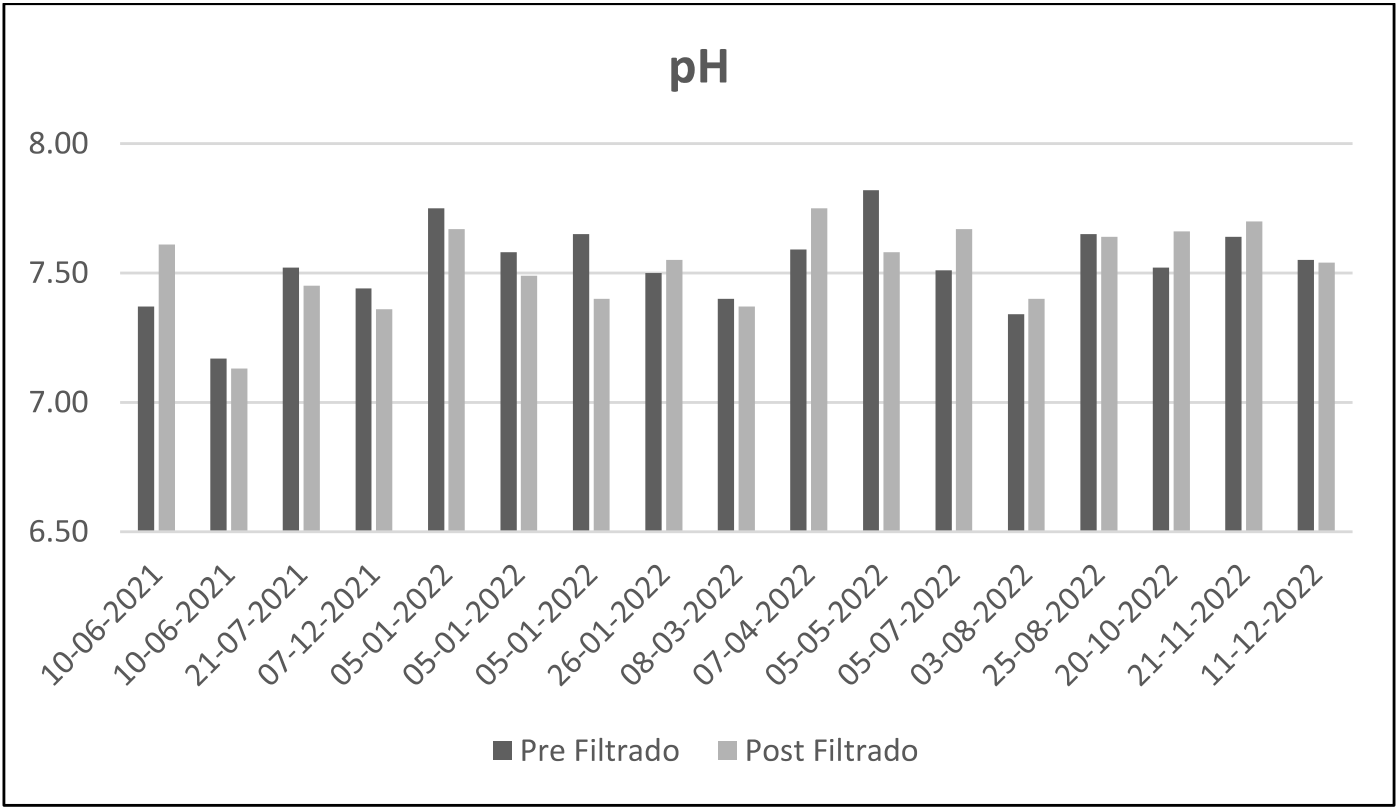


Figura 17.- Comparativa pH pre y post filtrado – El Yeso

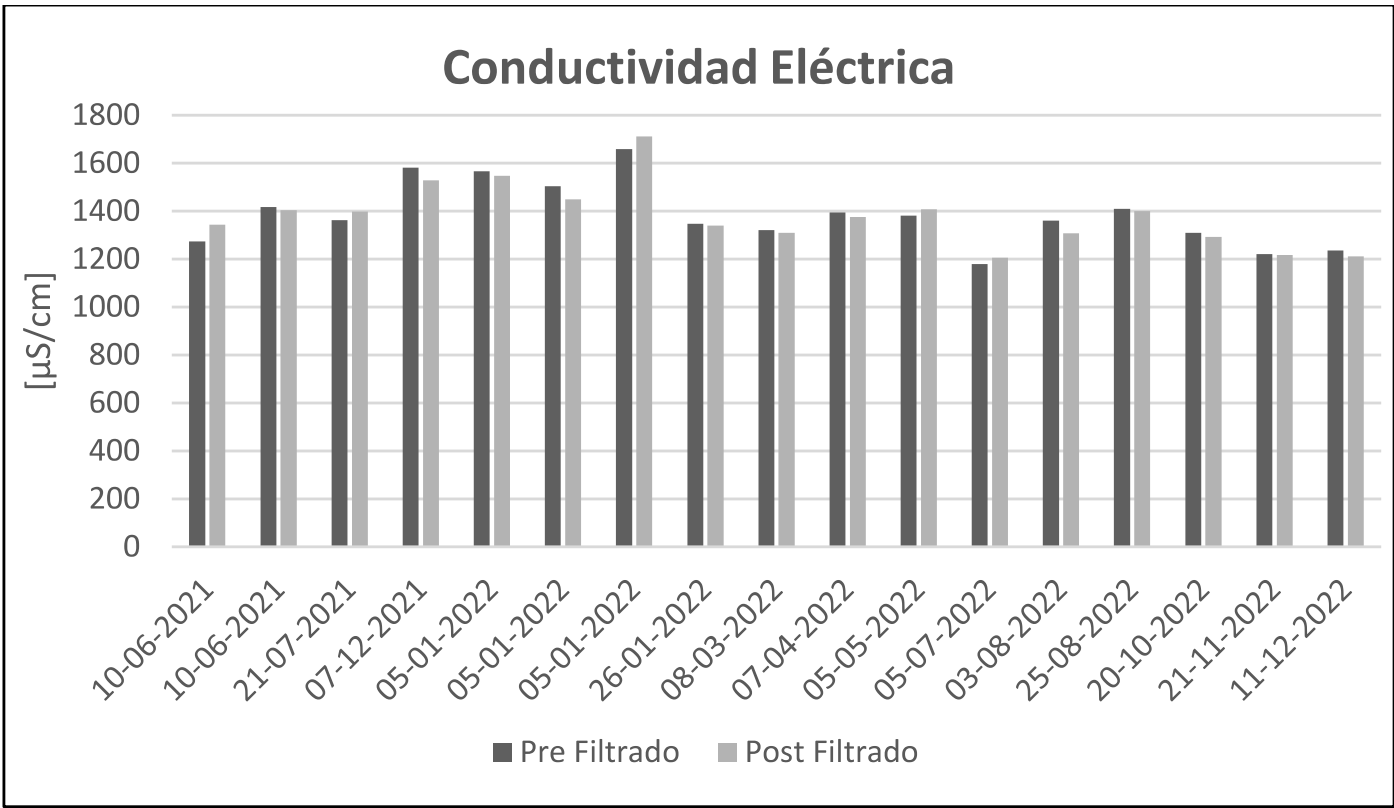


Figura 18.- Comparativa CE pre y post filtrado – El Yeso

6.2.- Juncalillo

La Tabla 4 presenta los resultados de las mediciones de turbidez y CSS para las muestras obtenidas en el río Juncalillo.

Tabla 4.- Resultados de medición río Juncalillo

Fecha	Ubicación	Turbidez [FTU]	CSS [mg/L]
11-12-2020	NNTK1 - S1 R5-1	17.90	50.62
06-08-2021	NNTK1 - S2 R5-1	39.17	99.02
13-12-2021	NNTK1 - S1 R5-1	4.80	11.20
13-12-2021	NNTK1 - S2 R5-1	5.16	15.95
28-01-2022	NNTK1 - S1 R5-1	8.69	23.46
28-01-2022	NNTK1 - S2 R5-1	12.49	20.80
04-03-2022	NNTK1 - S2 R5-1	5.34	9.13
04-03-2022	NNTK1 - S1 R5-1	5.28	15.28
01-04-2022	NNTK1 - S2 R5-1	2.49	9.13
01-04-2022	NNTK1 - S1 R5-1	4.31	15.22
25-05-2022	NNTK1 - S2 R5-1	5.38	12.22
25-05-2022	NNTK1 - S1 R5-1	2.70	6.12
07-09-2022	NNTK1 - S2 R5-1	31.69	83.94
07-09-2022	NNTK1 - S1 R5-1	30.18	87.87
06-10-2022	NNTK1 - S2 R5-1	24.98	61.84
06-10-2022	NNTK1 - S1 R5-1	25.35	68.35
10-11-2022	NNTK1 - S2 R5-1	38.92	133.91
10-11-2022	NNTK1 - S1 R5-1	34.97	116.00
06-12-2022	NNTK1 - S2 R5-1	18.72	37.58
06-12-2022	NNTK1 - S1 R5-1	17.51	32.92
-	Agua río Instrum M2	3.07	8.58
-	Agua río Instrum M1	2.39	8.43
-	Agua río arriba M1	1.55	8.53

Para más detalles respecto a las mediciones de turbidez y de los parámetros para determinar la CSS revisar el Anexo 3 y Anexo 6 respectivamente.

Por otro lado, la Figura 19 presenta la correlación entre la CSS y la turbidez de las muestras del río Juncalillo. La Ecuación 11 presenta la correlación lineal de estas variables.

$$CSS = 2.927 * T - 2.954$$

(11)

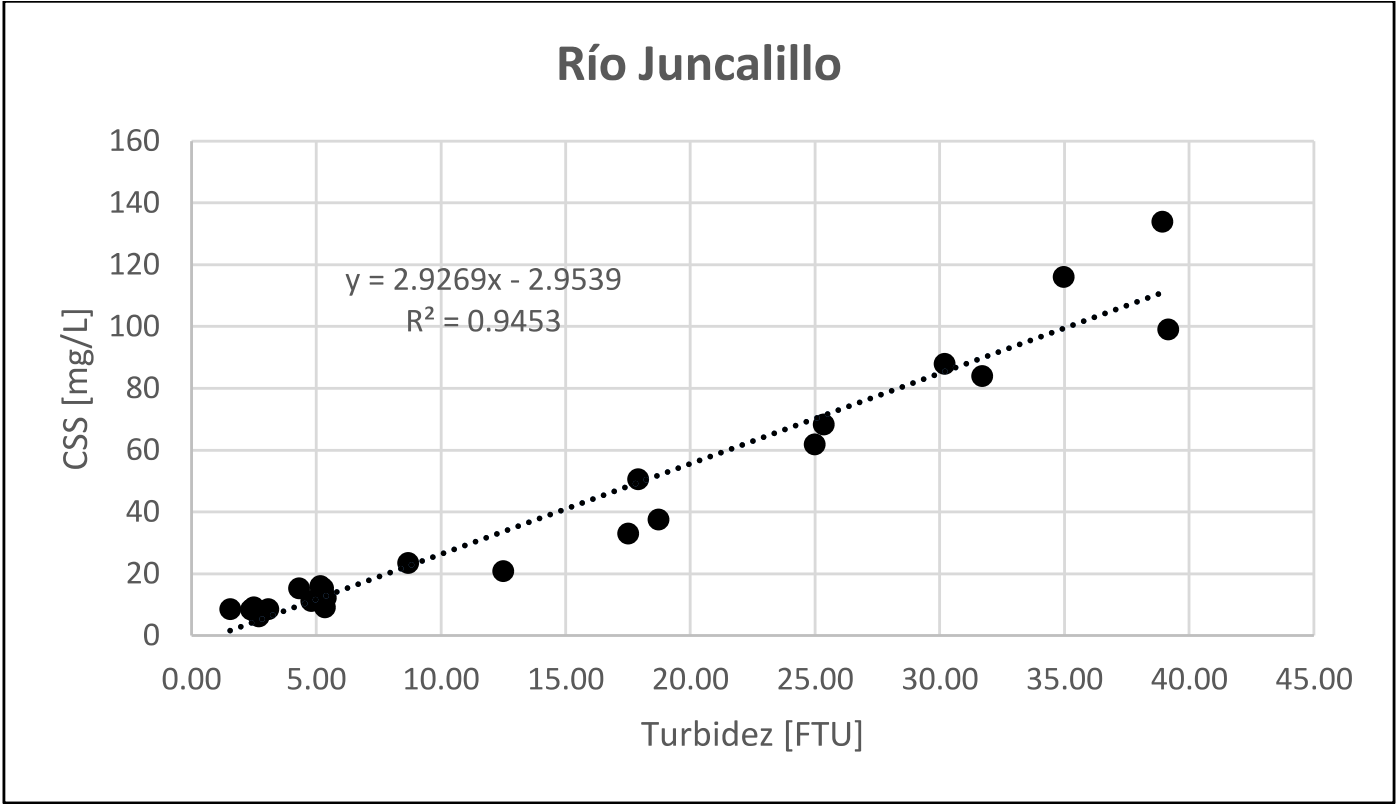


Figura 19.- Correlación río Juncalillo

De igual forma la Figura 20 presenta gráficamente la temporalidad de la CSS para las muestras obtenidas en el aforo del río.

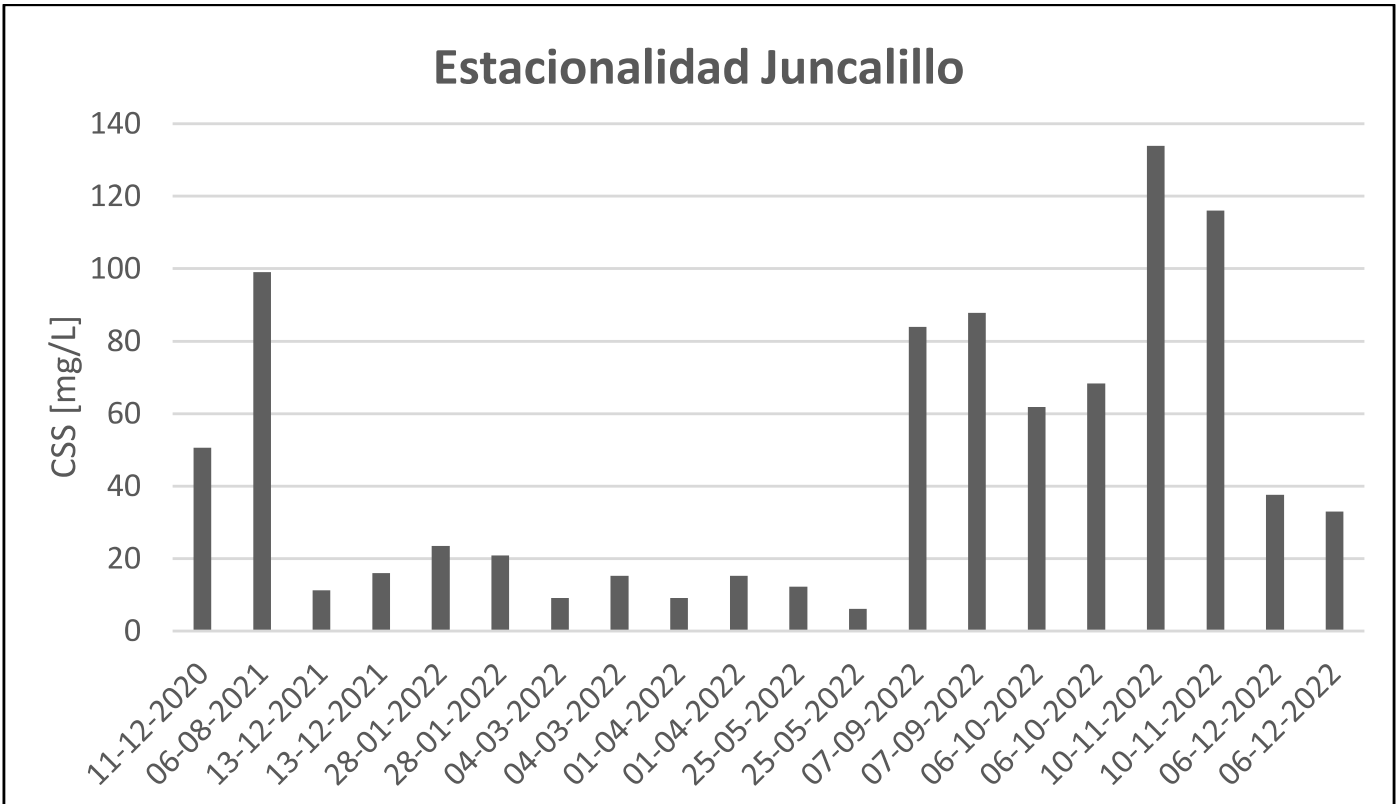


Figura 20.- Temporalidad CSS río Juncalillo

6.2.1.- Mediciones de pH y CE

La Tabla 5 presenta los resultados asociados a la medición de pH y CE antes y después del filtrado de las muestras obtenidas en el río Juncalillo.

Tabla 5.- Resultados de medición de pH y CE – Juncalillo

Fecha	Ubicación	pH		CE [μS/cm]	
		Pre Filtrado	Post Filtrado	Pre Filtrado	Post Filtrado
06-08-2021	NNTK1 - S2-R5-1	7.16	7.37	390	370
13-12-2021	NNTK1 - S1-R5-1	7.03	7.40	266	283
28-01-2022	NNTK1 - S1-R5-1	7.46	7.38	300	294
01-04-2022	NNTK1 - S2-R5-1	7.02	7.35	377	368
01-04-2022	NNTK1 - S1-R5-1	7.05	7.49	388	400
25-04-2022	NNTK1 - S1-R5-1	7.09	7.18	402	386
25-05-2022	NNTK1 - S2 R5 - 1	7.14	7.08	372	366
25-05-2022	NNTK1 - S1-R5-1	7.47	7.60	389	368
07-09-2022	NNTK1 - S2 R5-1	7.70	7.65	335	341
07-09-2022	NNTK1 - S1 R5-1	7.71	7.70	334	334
06-10-2022	NNTK1 - S2R5 - 1	7.62	7.58	291	295
06-10-2022	NNTK1 - S1R5 - 1	7.58	7.43	312	318
10-11-2022	NNTK1 - S2R5 - 1	7.52	7.71	167	173
10-11-2022	NNTK1 - S1R5 - 1	7.55	7.72	169	171
06-12-2022	NNTK1 - S2R5 - 1	7.54	7.75	155	163
06-12-2022	NNTK1 - S1R5 - 1	7.93	7.78	167	187
-	Agua río Instrum M2	7.33	7.58	375	372
-	Agua río Instrum M1	7.53	7.61	371	377
-	Agua río arriba M1	7.02	7.37	362	348

Adicionalmente, la Figura 21 y la Figura 22 presentan una comparativa grafica entre los resultados pre y post filtrado del pH y de la CE respectivamente.

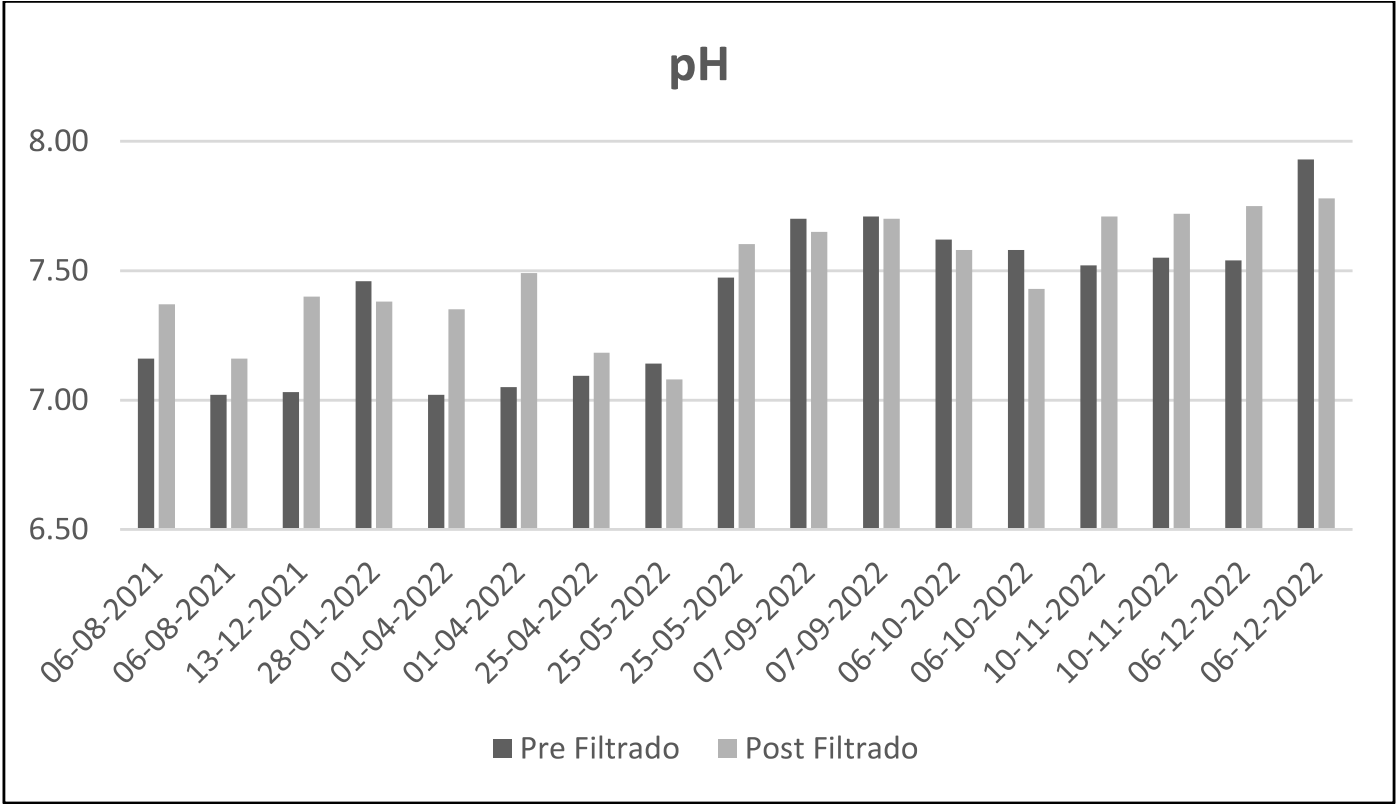


Figura 21.- Comparativa pH pre y post filtrado – Juncalillo

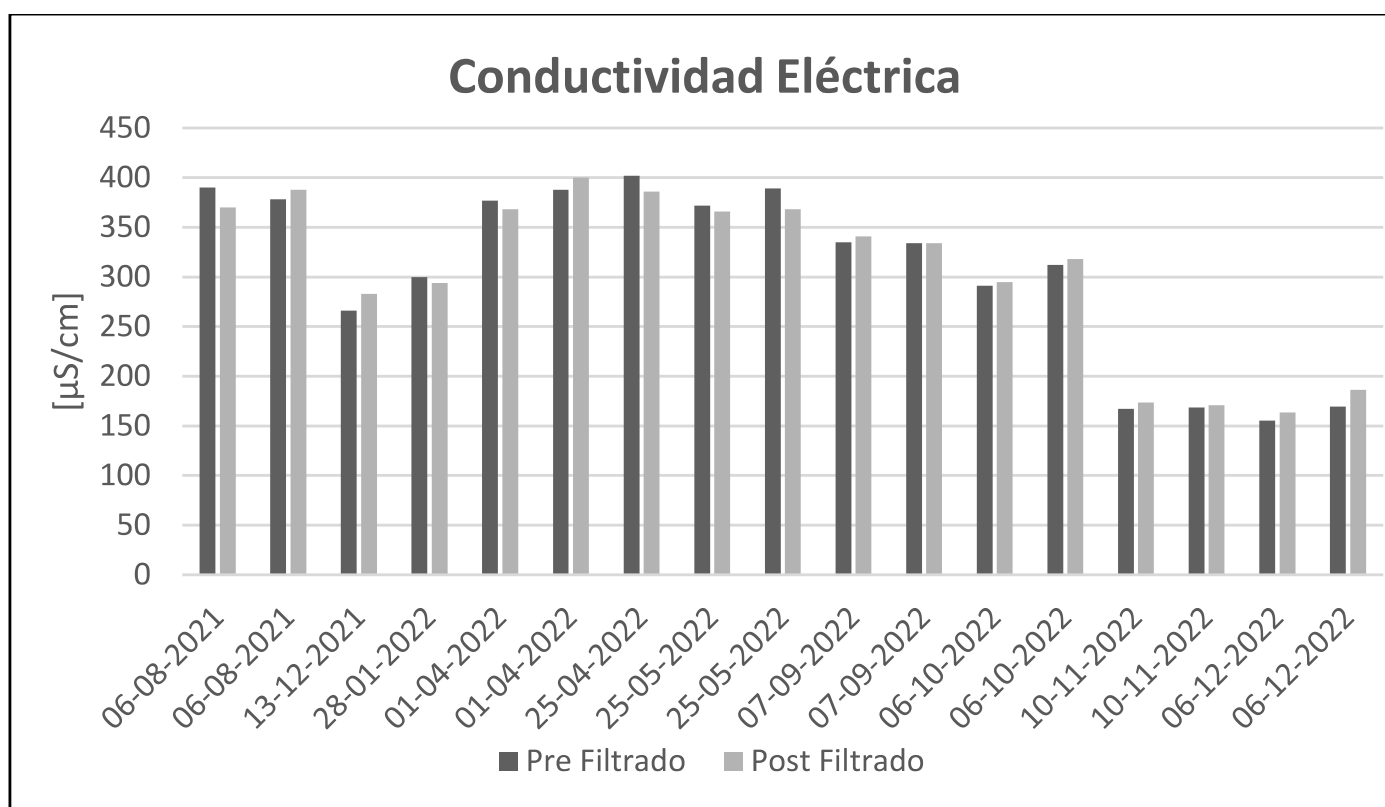


Figura 22.- Comparativa CE pre y post filtrado – Juncalillo

6.3.- El Yeso y Juncalillo combinado

La Figura 23 presenta la correlación existente dado el total mediciones realizadas tanto para el río Yeso, como para el río Juncalillo. Así mismo, la Ecuación 12 presenta la correlación lineal de estas variables.

$$CSS = 3.76 * T - 10.644 \quad (12)$$

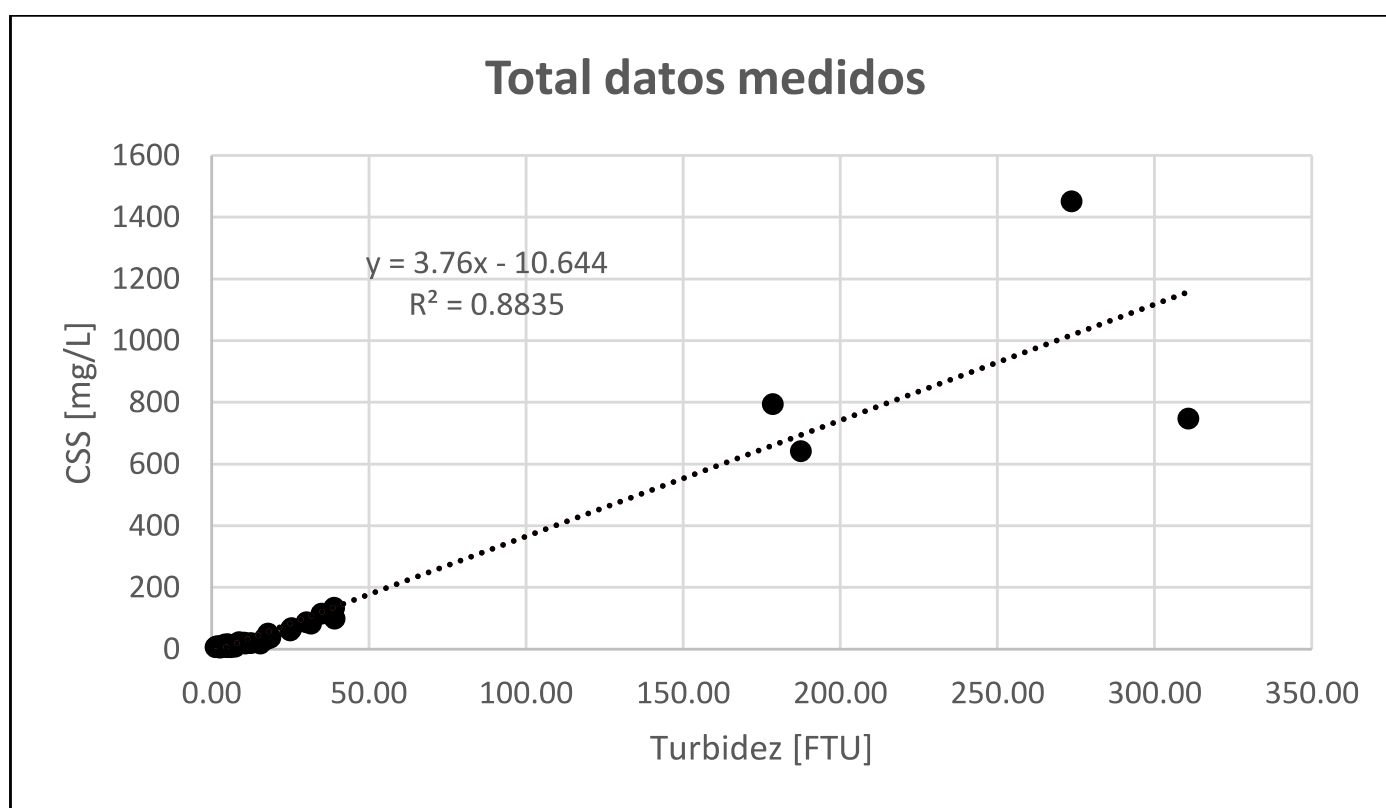


Figura 23.- Correlación utilizando todos los datos

Finalmente, la Figura 24 muestra una comparativa de las regresiones lineales para las 3 zonas de estudio (El Yeso – Embalse, El Yeso – Aforo y Juncalillo), además de incluir la combinación del total de las muestras.

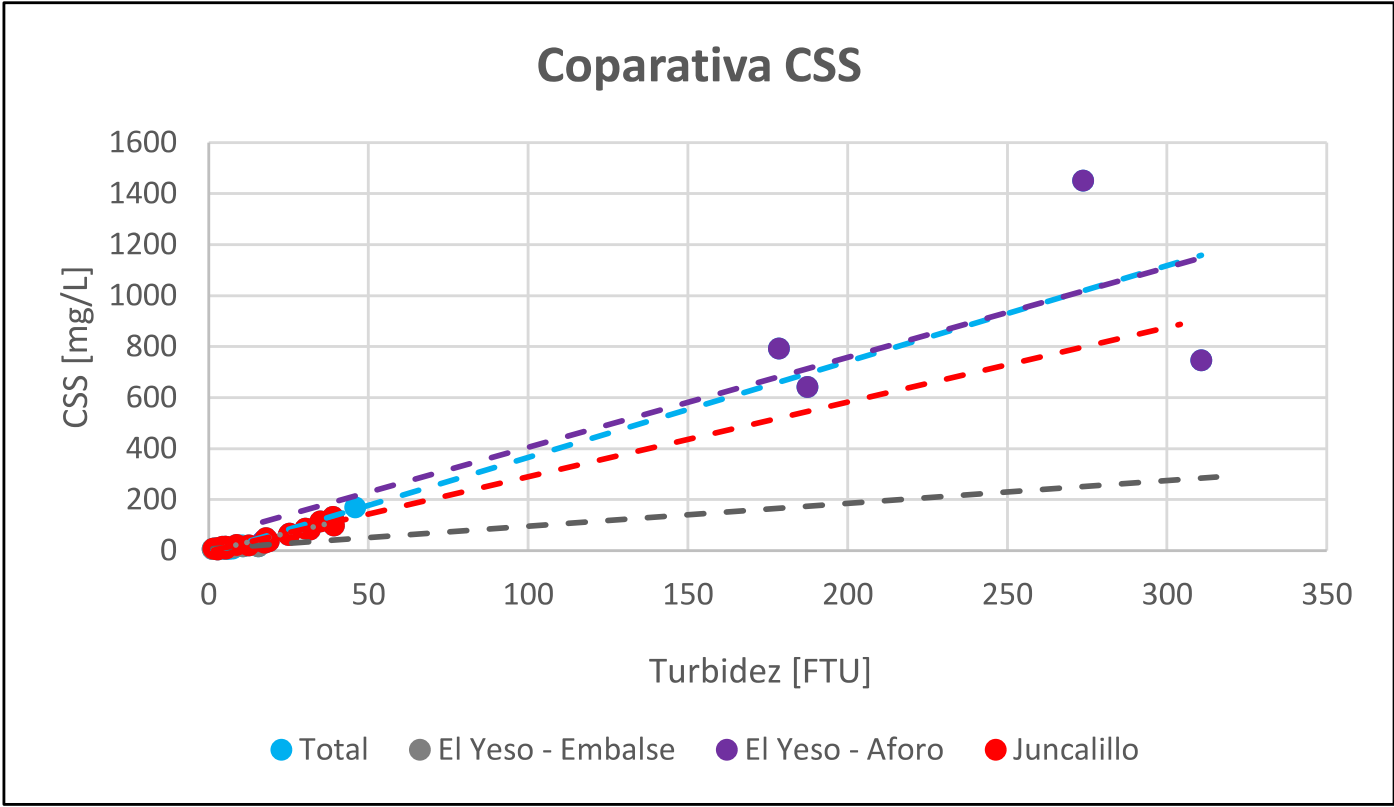


Figura 24.- Comparativa regresión distintas zonas de estudio

7.- Análisis de Resultados

7.1.- El Yeso

7.1.1.- Embalse El Yeso

Se analizan un total de 19 muestras correspondientes a los años 2021 y 2022. La Figura 13 presenta la correlación entre la CSS y la turbidez de dichas muestras, en donde se observa principalmente que la CSS es directamente proporcional a la turbidez, lo que lleva a que la correlación se comporte linealmente con un $R^2 = 0.674$, además, se puede notar que las mediciones de turbidez y de CSS en esta zona son bajas (con un máximo de app de 16 [FTU] y 19 [mg/L] respectivamente), esto puede ser esperable dado que en el embalse el agua está prácticamente estática, y la presencia de sedimentos suspendidos se produce por condiciones externas (por ejemplo a las cargas o descargas de agua proveniente al río). Por otro lado, la Figura 14 muestra un gráfico de temporalidad de las muestras analizadas, en la cual se observa que existe un pick en julio del 2021 y agosto del 2022 (que puede ser asociado a aumento de las aguas provenientes de un régimen pluvial), además, de enero y marzo del 2022 (que puede ser asociado a un aumento en aguas provenientes a un régimen nival o al mayor uso del embalse en sí). Por otro lado, los valores más bajos ocurren en diciembre del 2021 y en abril del 2022, lo cual puede ser producto a bajos caudales de carga o descarga en estos meses o simplemente a que los fenómenos externos que provocan la suspensión de las partículas en el embalse sean menos determinantes.

7.1.2.- Aforo

Para el caso del aforo se analizaron un total de 5 muestras correspondientes a enero del 2022, bastante menor a las realizadas en el embalse. La Figura 15 muestra la correlación entre la CSS y la turbidez de dichas muestras, en donde se observa que se correlaciona linealmente con un $R^2 = 0.633$ (es esperable que esta correlación sea baja, puesto que se tienen pocos datos), además, se observa que en esta zona las mediciones de turbidez y de CSS son bastante mayores a las medidas en el embalse (alrededor de 311 [FTU] y 1452 [mg/L] respectivamente), esto principalmente a que el régimen o turbulencia en el aforo es mucho mayor al del embalse. Por otra parte, la Figura 16 muestra un gráfico de temporalidad de las muestras analizadas, en el cual es difícil concluir puesto que todas corresponden al mismo mes y año, además, de que se desconoce el horario en que se tomaron las muestras para realizar un análisis de acuerdo al horario o el orden en el que se realizó el muestreo, pero si se observa que durante el día existe una variabilidad temporal (se esperaría que el pick ocurriera a medio día, donde los caudales productos al deshielo son mayores, mientras que el valor bajo haya ocurrido en la mañana, donde las temperaturas son menores por ende los caudales provenientes a los deshielos sean menores).

7.1.3.- Mediciones de pH y CE

Las mediciones de pH y CE se empezaron a realizar tiempo después del inicio de las mediciones de turbidez y CCS, es por esto por lo que no se pudieron medir el total de las muestras (se analizaron un total de 17 de 24 muestras total medidas en el Yeso).

Los valores de pH del agua se mantienen dentro de los normales a los asociados a aguas superficiales, y de acuerdo con la CE está dentro del rango que permite la potabilización para el consumo humano.

En la Figura 17 se muestra una comparativa de las mediciones de pH realizadas antes y después del filtrado de las muestras. De la comparativa no se observa una tendencia clara, puesto que en algunas muestras los resultados de pH pre filtrado son menor al post filtrado, mientras que en otras muestras ocurre lo contrario. Por otro lado, se observa que existe una variación entre ambas (pre y post filtrado) pero esta no es tan significativa, esto último también se puede observar en las Figura 25, las cuales presentan la razón entre el pH_{pre} filtrado y pH_{post} filtrado, dado que se mantiene bastante uniforme cercano a 1. Respecto a la temporalidad es difícil concluir algo, producto a que no se observa una tendencia clara, además no se tiene una base de datos tan robusta.

Por otro lado, analizando la CE, se observa de la Figura 18 que respecto a la temporalidad la CE se mantiene bastante uniforme a través del tiempo y al igual que el pH de la Figura 26 se observa que los valores de CE_{pre}/CE_{post} se mantiene rondando el 1, por otra parte si se nota que existe un pequeño pick en enero, el cual puede ser producido debido aguas provenientes a cargas y descargas de un régimen nival (estas aguas pueden traer algún mineral que aumente la dureza del agua y por ende el aumento de la CE).

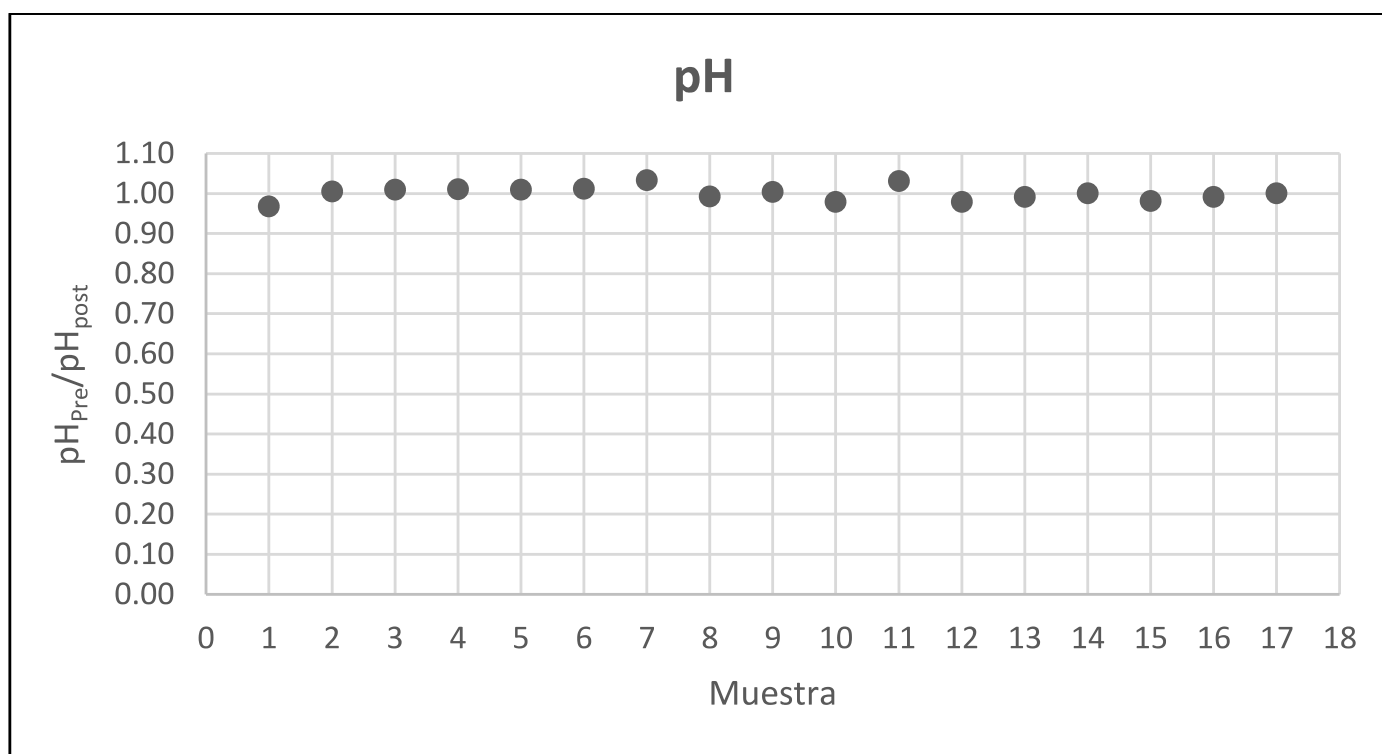


Figura 25.- Razón de pH pre y post filtrado – El Yeso.

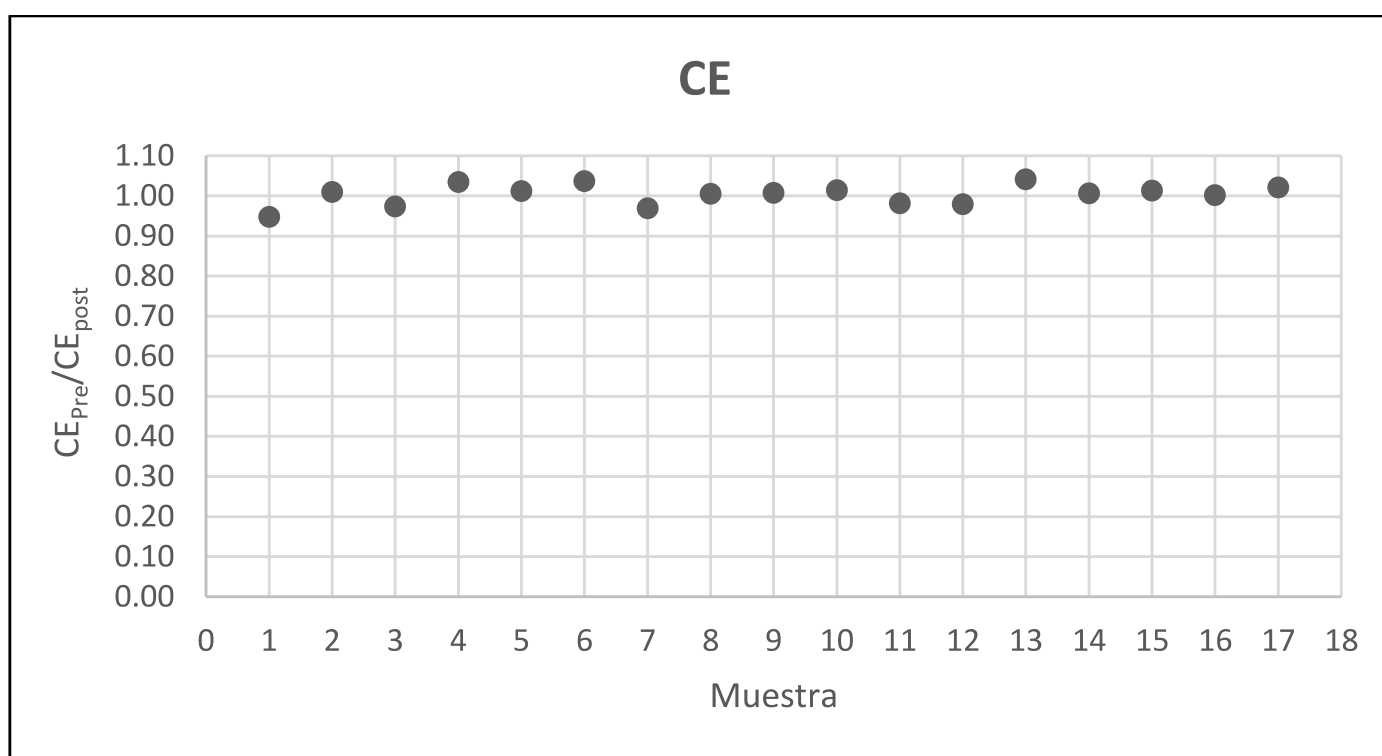


Figura 26.- Razón de CE pre y post filtrado – El Yeso.

7.2.- Juncalillo

En la zona de Portillo se analizaron un total de 23 muestras (en las que cuales 3 muestras se desconoce la fecha de medición, por lo cual estas se descartan en los análisis de temporalidad) en el río Juncalillo correspondientes a los años 2020, 2021 y 2022. En la Figura 19 se muestra la correlación entre la CSS y la turbidez de dichas muestras, donde se observa que se correlaciona linealmente con un $R^2 = 0.945$, además, de que en esta zona los resultados de turbidez y de CSS se distribuyen en un mayor rango. Por otra parte, la Figura 20 presenta gráficamente la temporalidad asociada a la CSS de las muestras

analizadas, en la cual se observa que los picks ocurren principalmente en los meses de primavera los cuales tienen asociados regímenes pluvio – nival.

Por otro lado, y a diferencia a los resultados del Yeso en la Figura 21 si se pueden observar variaciones más significativas en algunas muestras respecto al pH pre y post filtrado (se analizaron 19 de 23 muestras), pero realizando un análisis de proporcionalidad entre el pH_{pre} y pH_{post} filtrado (Figura 27) los resultados indican que esta variación no son significativas y dado que se mantiene bien cercanas a 1 al igual que lo ocurrido con las muestras en El Yeso. Adicionalmente asociado a la temporalidad (Figura 21) se puede notar que hay un aumento en los resultados obtenidos en el año 2022 en comparación al año 2021. A pesar de estos aumentos los valores de pH se encuentran dentro de los valores normales correspondientes a aguas superficiales.

Con respecto a la CE en la Figura 22 no se observa una variación significativa con respecto al pre y post filtrado, aunque analizando los valores asociados a CE_{pre}/CE_{post} se puede notar que existen variaciones cercanas al 10%, a pesar de esto los valores se mantienen uniformes y cercanos a 1 (Figura 28). Respecto a la temporalidad de la Figura 22 también se puede notar que la CE viene a la baja a partir de abril del 2022. Los valores de CE indican que se encuentra entre los rangos de agua de montaña y agua para el consumo humano.

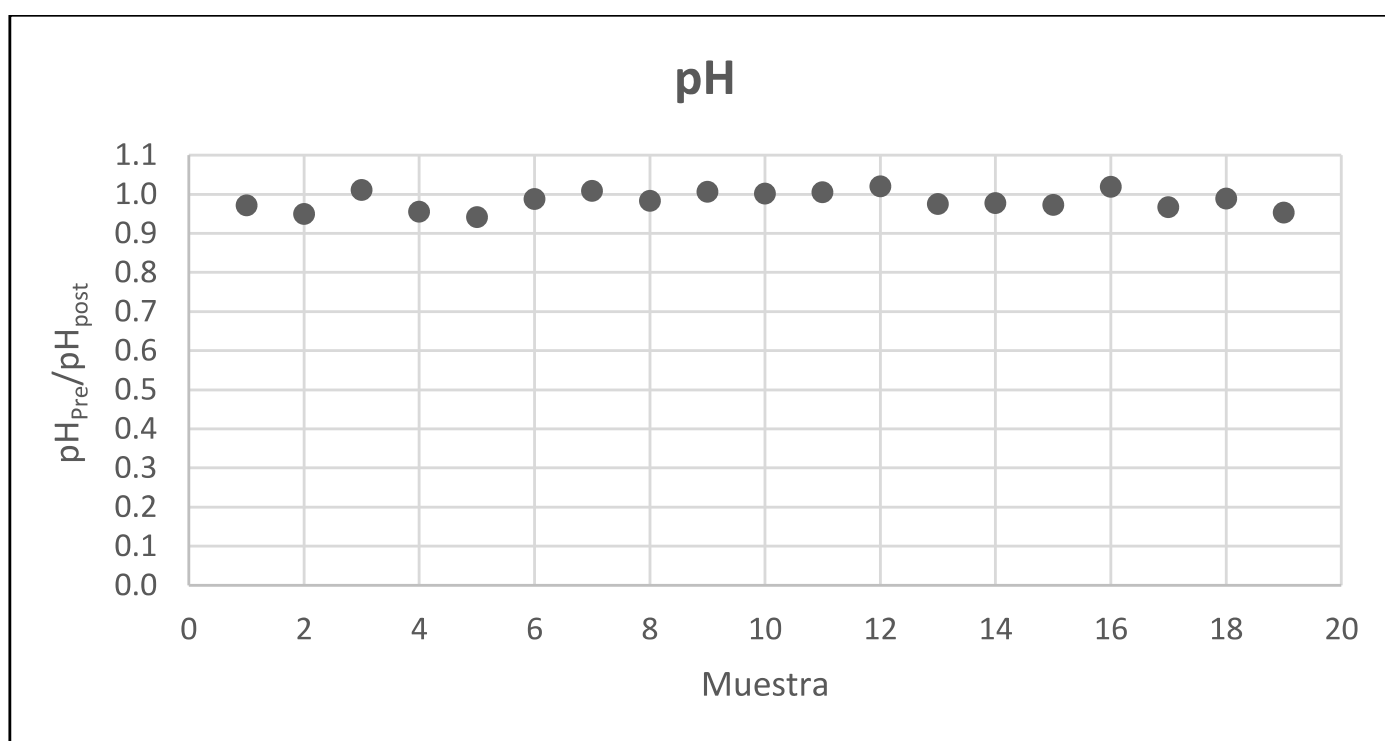


Figura 27.- Razón de pH pre y post filtrado – Juncalillo.

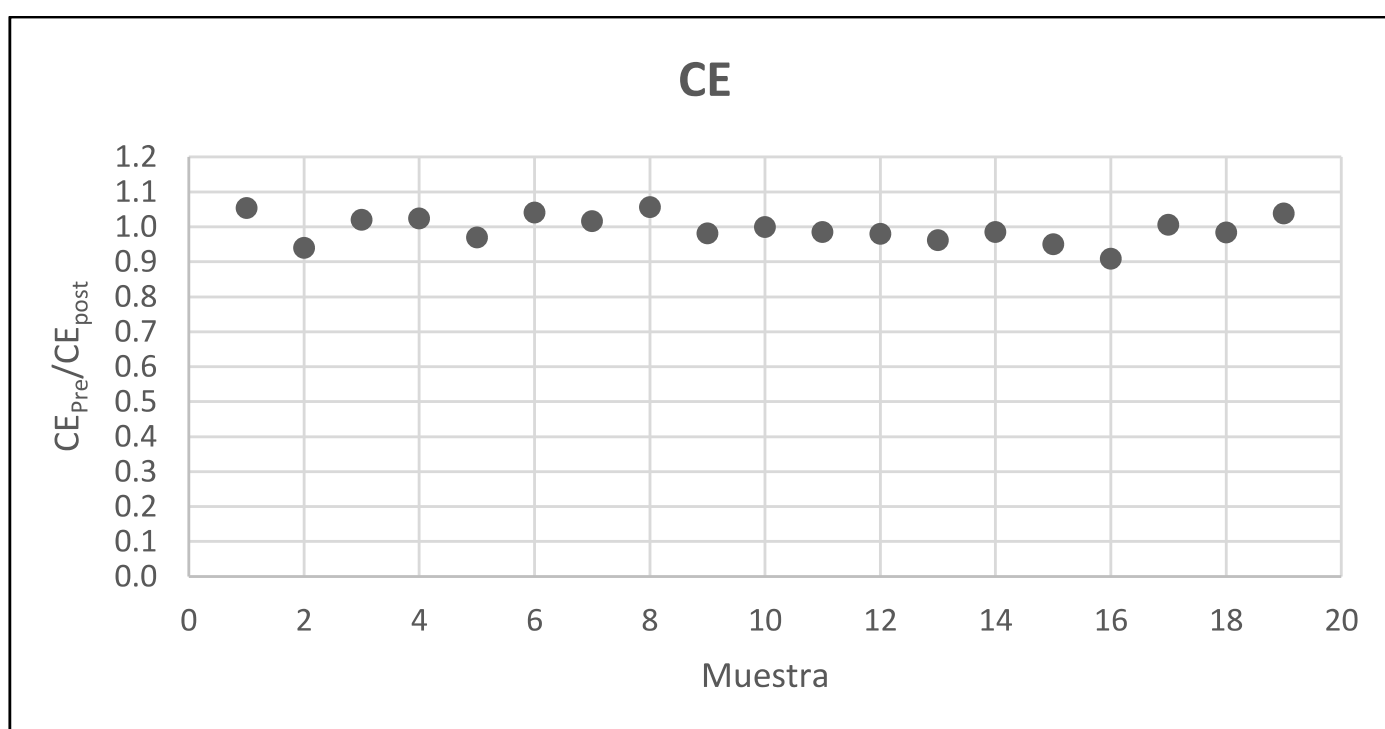


Figura 28.- Razón de CE pre y post filtrado – Juncalillo.

7.3.- Comparación El Yeso y Juncalillo

La Figura 23, presenta la regresión lineal entre las mediciones de turbidez y CSS de todo el estudio (48 muestras), ignorando la zonificación, en la cual al igual que en las otras resulta que la CSS es directamente proporcional a la turbidez, donde se obtiene una regresión lineal con un $R^2 = 0.884$, el cual es bastante alto y bueno.

Para complementar, la Figura 24 presenta una comparativa gráfica de las correlaciones obtenidas en las tres zonas analizadas (Embalse – El Yeso, Aforo – El Yeso y Juncalillo), además de la obtenida con el total de las mediciones, donde se observa que las regresiones del Aforo, Juncalillo y total son bastante similares (esto también se puede observar en las ecuaciones) puesto que presentan expresiones muy parecidas. Por otra parte, para el caso del embalse esta se comporta diferente al resto, dado a que posee una pendiente mucho más pequeña, esto se debe a como ya se mencionó con anterioridad al flujo de agua de donde se obtienen estas muestras, puesto que este es prácticamente estático y las partículas de sedimentos se encuentran en suspensión producto a otros fenómenos.

8.- Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo general de este estudio fue obtener una expresión empírica a partir de muestreo de campo para los ríos Yeso y Juncalillo (ambos ubicados en los Andes centrales), la cual permita determinar la concentración de sedimentos en suspensión desde mediciones ópticas de turbidez. Determinar esta expresión tiene como finalidad ser utilizada en la predicción del transporte de sedimentos en zonas de alta montaña con características similares a las zonas de estudio. Para cumplir este objetivo fue necesario medir la CSS y la turbidez de las muestras obtenidas de los ríos en laboratorio tal como se mencionó en el cuerpo del documento.

Posterior a los resultados y análisis es posible concluir y afirmar que la CSS es directamente proporcional a la turbidez, lo cual resulta lógico puesto que la turbidez mide la transparencia del agua y con la presencia de los sedimentos esta disminuye, provocando así un aumento en la turbidez.

Se determinaron principalmente 3 expresiones empíricas (Ecuación 9, 10 y 11), una para cada zona de estudio (las cuales tienen condiciones geográficas y de flujo distintas), las regresiones de las cuales se determinan estas ecuaciones tienen un comportamiento lineal (a excepción en el aforo, la cual debe su baja correlación a la poca cantidad de muestras analizadas en dicha zona). Adicionalmente se presentó una cuarta ecuación (Ecuación 12), la cual es determinada con la totalidad de los datos obtenidos de los ensayos. De esto se puede concluir que a pesar de ser de zonas y condiciones distintas las Ecuaciones 10, 11 y 12 tienen una relación bastante parecida puesto que poseen valores de pendientes similares a diferencia con la Ecuación 9 la cual posee una pendiente inferior, esto principalmente a que el flujo de los ríos es turbulento, mientras que en el embalse el agua está estática y los sedimentos en suspensión presentes no se deben al flujo.

Para realizar las estimaciones de CSS es recomendable usar la ecuación correspondiente a su zona de análisis y para el rango correspondiente a los resultados (esto para no extrapolar valores) de tal forma de minimizar al máximo los errores.

Con respecto al análisis temporal se pudo observar que existen variaciones a través del horario y de la temporada en que se realiza el muestreo, aunque es difícil concluir algo certero puesto que no se tiene una base de datos robusta, pero con los datos obtenidos se pudo tener una idea de lo que está ocurriendo. Es recomendable realizar otro tipo de muestreo en el caso de querer estudiar con mayor detalle la temporalidad, por ejemplo, realizar las tomas de muestras una vez por semana a la misma hora del día por un par de años, o en un mismo día tomar muestras cada media hora, y así obtener una base de datos más completa.

Del estudio realizado de pH y CE, se concluye principalmente que ambas zonas poseen aguas en un rango normal de pH correspondiente al agua superficial (entre 6.5 y 8.5), y que ambas están en el rango

de CE permitido para ser potabilizadas. Además, se puede concluir que no existen variaciones importantes de pH con y sin la presencia de sedimentos en el agua dado que de acuerdo con los análisis realizados esta variación no es superior al 10%, a pesar de esto sería interesante realizar un estudio más exhaustivo de los sedimentos (tipo de sedimentos y elementos químicos presentes en estos) y así poder concluir de mejor manera a que se deben estas pequeñas variaciones.

Adicionalmente, sería ideal seguir con las mediciones de CSS en laboratorio, sobre todo para la zona del aforo en El Yeso, esto con el fin de ampliar la base de datos y así lograr obtener mejores calibraciones de las expresiones y por ende obtener mejores resultados en la determinación de la CSS.

9.- Referencias

- Agrawal, Y. C., Mikkelsen, O. A., & Pottsmith, H. C. (2011). Sediment monitoring technology for turbine erosion and reservoir siltation applications. *Proc. HYDRO 2011 Conference, Prague, Czech Republic*.
- Aquatec Group Ltd. (2022). *Advanced Turbidity Logger AQUAlogger® 310TY-Buyer's Guide*. www.aquatecgroup.com
- ASTM International. (1997). *D3977 - 97 Reap19: Standard Test Methods for Determining Sediment Concentration in Water Samples*. <https://doi.org/10.1520/D3977-97R19>
- Basile, P. A. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales* (UNR Editora, Ed.; Primera Edición, Vol. 1). Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Dietrich Barsch, & Nel Caine. (1984). The Nature of Mountain Geomorphology. *Mountain Research and Development*, 4. <https://doi.org/10.2307/3673231>
- Dyer, K. R. (1995). Sediment transport processes in estuaries. In *Developments in Sedimentology* (Vol. 53, pp. 423–449). Elsevier.
- Edwards, T. K., Glysson, G. D., Guy, H. P., & Norman, V. W. (1999). *Field methods for measurement of fluvial sediment*. US Geological Survey Denver, CO.
- Federal Interagency Sedimentation Project, F. (2000). *Federal Interagency Sedimentation Project sampling with the US D-95 depth-integrating suspended-sediment sampler*. <http://fisp.wes.army.mil>
- Federal Interagency Sedimentation Project, F. (2002). *Operator's manual for the US P-61-A1 point-integrating suspended-sediment sampler*. <http://fisp.wes.army.mil>
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Yuka, K. L. E., Estrada, O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., Maccracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- Filippa, L., Freire, L., Trento, A., Álvarez, A. M., Gallo, M., & Vinzón, S. (2011). Laboratory evaluation of two LISST-25X using river sediments. *Sedimentary Geology*, 238(3–4), 268–276.
- Flores, M. G., Álvarez, J. A. M., & Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería (México D.F.). (1998). *Origen y propiedades de los sedimentos: capítulo 7 del Manual de ingeniería de ríos*. Instituto de Ingeniería del UNAM. <https://books.google.cl/books?id=T6J8MwEACAAJ>
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2008). Glaciares: ¿Cómo y dónde estudiarlos? *Coordinador General Del Programa Nacional de Cambios Climáticos*, 2, 9.
- HANNA INSTRUMENTS. (2022). *Manual de Instrucciones*.
- Hudson, N. W. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía* (Vol. 68). Food & Agriculture Org.
- Informe de Interagency Water Resources Council – Subcommittee on Sedimentation. (1940). *A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams. Report N° 1: Field Practice and Equipment Using in Sampling Suspended Sediments*.
- J. Salcedo-Castro, C. Romero, P. T. Bustamante, & N. B. Bassi. (2020). *Response flow and sediment flow at the mouth of rivers of central Chile during warm Enso episodes*.
- Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2003). Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatter from an ADCP. *Proceedings of Coastal Sediments*, 3.
- Kineke, G. C., & Sternberg, R. W. (1992). Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. *Marine Geology*, 108(3–4), 253–258.
- López Sardi, E. M., & Máximo Broitman, A. (2014). Calidad del agua domiciliaria. Experiencia de aprendizaje en el transcurso de un proyecto de investigación: aplicación del método científico. *Universidad de Palermo*.

- López-Moreno, J. I., & García-Ruiz, J. M. (2004). Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees / Influence de l'accumulation et de la fonte de la neige sur les écoulements dans les Pyrénées centrales espagnoles. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5). <https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.787.55135>
- Mao, L., & Carrillo, R. (2017). Temporal dynamics of suspended sediment transport in a glacierized Andean basin. *Geomorphology*, 287, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.003>
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., Garcia, M. d, Marcó, L., & Azario, R. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4(11).
- Menares, K., & López, A. (2012). Análisis de muestreos rutinarios e integrados de sedimentos en suspensión: caso de cuencas en Chile Central. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica*.
- Méndez-Freire, V., Villaseñor, T., & Mellado, C. (2022). Spatial and temporal changes in suspended sediment fluxes in central Chile induced by the mega drought: The case of the Itata River Basin (36°-37°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 118, 103930. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2022.103930>
- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- NASA Goddard Institute for Space Studies. (2022). *GISS Surface Temperature Analysis v4*. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/
- Restrepo, J. C., & Pierini, J. O. (2012). Medición de la concentración de sedimentos en suspensión mediante dispositivos ópticos y acústicos: aplicación en sistemas tropicales (Delta del río Mira, Colombia). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(1), 153–168.
- Rijn, L. C. van. (1984). Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1613–1641.
- Rouse, H. (1937). Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 102(1), 463–505.
- Sigler, A., & Bauder, J. (2017). Alcalinidad, pH, y sólidos disueltos totales. *Obtenido de Well Educated Educación En El Agua de Pozo: Http://Region8water. Colostate. Edu/PDFs/We_espanol/Alkalinity_pH_TDS*, 20, 2011–2012.
- van Rijn, L. C. (2007). *Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas*. Rijkswaterstaat, Aqua Publications.
- World Health Organization. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. *Guía. Guinebra*.
- Wright, S. A., Topping, D. J., & Williams, C. A. (2010). Evaluation of acoustic profilers for discriminating silt-and-clay from suspended-sand in rivers. *II Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June*.
- Zamora, J. R. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, 9(12), 125–134.

Anexos

A.1.- Mediciones de turbidez

A continuación, se presentan las tablas correspondientes a los resultados de las 3 mediciones correspondientes a la turbidez de las muestras, además se presenta el promedio y la desviación estándar de cada una de ellas.

Anexo 1.- Turbidez muestras en Embalse El Yeso.

Fecha	Ubicación	T1 [FTU]	T2 [FTU]	T3 [FTU]	Turbidez [FTU]	σ
07-06-2021	NNTK2 - S2 R5-1	1.83	1.72	1.78	1.78	0.1
07-06-2021	NNTK2 - S1 R5-1	3.22	3.15	3.21	3.19	0.0
10-06-2021	NNTK2 - S3-R5-1	5.43	5.33	5.21	5.32	0.1
10-06-2021	NNTK2 - S1-R5-1	4.38	4.89	4.30	4.52	0.3
21-07-2021	NNTK2 - S2 R5-1	2.93	3.24	3.14	3.10	0.2
21-07-2021	NNTK2 - S1 R5-1	11.22	10.67	10.32	10.74	0.5
07-12-2021	NNTK2 - S3 R5-1	1.36	1.13	1.27	1.25	0.1
05-01-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2.72	2.53	2.54	2.60	0.1
26-01-2022	NNTK2 - S1 R5-1	7.58	7.43	7.67	7.56	0.1
08-03-2022	NNTK2 - S1 R5-1	15.48	15.41	15.59	15.49	0.1
07-04-2022	NNTK2 - S1 R5-1	1.80	1.86	1.98	1.88	0.1
05-05-2022	NNTK2 - S1 R5-1	3.05	2.99	2.67	2.90	0.2
07-06-2022	NNTK2 - S1 R5-1	5.71	5.63	5.66	5.67	0.0
05-07-2022	NNTK2 - S1R5-1	5.92	6.02	6.19	6.04	0.1
03-08-2022	NNTK2 - S1R5-1	10.42	10.30	10.31	10.34	0.1
25-08-2022	NNTK2 - S1R5-1	5.16	4.88	5.17	5.07	0.2
20-10-2022	NNTK2 - S1R5-1	6.13	6.19	6.10	6.14	0.0
21-11-2022	NNTK2 - S1R5-1	4.87	4.77	4.93	4.86	0.1
11-12-2022	NNTK2 - S1R5-1	7.16	7.89	7.23	7.43	0.4

Anexo 2.- Turbidez muestras en Aforo El Yeso.

Fecha	Ubicación	T1 [FTU]	T2 [FTU]	T3 [FTU]	Turbidez [FTU]	σ
05-01-2022	NNTK2 - S_Y_Puente-R5-1	186.11	187.71	188.40	187.41	1.2
05-01-2022	NNTK2 - S_Y_Rojo-R5-1	16.27	17.23	17.09	16.86	0.5
05-01-2022	NNTK2 SY-DGA R5-1	273.67	274.04	273.24	273.65	0.4
26-01-2022	AFORO -RF-R1-2	309.95	310.69	311.64	310.76	0.8
26-01-2022	AFORO -RF-R1-2	180.21	178.24	177.06	178.50	1.6

Anexo 3.- Turbidez muestras en Río Juncalillo.

Fecha	Ubicación	T1 [FTU]	T2 [FTU]	T3 [FTU]	Turbidez [FTU]	σ
11-12-2020	NNTK1 - S1R5 - 1	17.96	17.95	17.78	17.90	0.1
06-08-2021	NNTK1 - S2-R5-1	38.79	39.24	39.47	39.17	0.3
13-12-2021	NNTK1 - S1-R5-1	4.62	4.92	4.86	4.80	0.2
13-12-2021	NNTK1 - S2 R5-1	5.33	5.20	4.94	5.16	0.2
28-01-2022	NNTK1 - S1-R5-1	8.67	8.78	8.62	8.69	0.1
28-01-2022	NNTK1 - S2 R5-1	12.50	12.29	12.69	12.49	0.2
04-03-2022	NNTK1 - S2 R5-1	5.36	5.30	5.37	5.34	0.0
04-03-2022	NNTK1 - S1-R5-1	5.28	5.50	5.05	5.28	0.2
01-04-2022	NNTK1 - S2-R5-1	2.48	2.47	2.52	2.49	0.0
01-04-2022	NNTK1 - S1-R5-1	4.32	4.27	4.34	4.31	0.0
25-05-2022	NNTK1 - S2 R5-1	5.51	5.05	5.58	5.38	0.3
25-05-2022	NNTK1 - S1-R5-1	2.75	2.69	2.66	2.70	0.0
07-09-2022	NNTK1 - S2 R5-1	31.81	31.72	31.54	31.69	0.1
07-09-2022	NNTK1 - S1 R5-1	29.75	30.25	30.55	30.18	0.4
06-10-2022	NNTK1 - S2R5-1	24.75	25.13	25.05	24.98	0.2
06-10-2022	NNTK1 - S1R5-1	25.27	25.37	25.42	25.35	0.1
10-11-2022	NNTK1 - S2R5-1	38.29	38.74	39.73	38.92	0.7
10-11-2022	NNTK1 - S1R5-1	34.86	35.02	35.04	34.97	0.1
06-12-2022	NNTK1 - S2R5-1	18.81	18.87	18.47	18.72	0.2
06-12-2022	NNTK1 - S1R5-1	17.43	17.46	17.63	17.51	0.1
-	Agua río Instrum M2	2.88	3.16	3.18	3.07	0.2
-	Agua río Instrum M1	2.36	2.37	2.44	2.39	0.0
-	Agua río arriba M1	1.52	1.57	1.55	1.55	0.0

A.2.- Mediciones de parámetros de la CSS

A continuación, se presentan las tablas con los parámetros utilizados en la determinación de la CSS.

Anexo 4.- Parámetros determinación CSS – Embalse El Yeso.

Fecha	Código	P _{muestra-bruto} [g]	P _{recipiente} [g]	P _{muestra-neto} [g]	P _{filtro-bruto} [g]	P _{filtro} [g]	P _{sedimento-neto} [g]	C ₁ [ppm]	Factor	CSS [mg/L]
07-06-2021	NNTK2 - S2 R5-1	2265.87	152.20	2113.67	1.1339	1.1140	0.0200	9.48	1.00	9.48
07-06-2021	NNTK2 - S1 R5-1	2168.07	150.20	2017.87	1.1367	1.1151	0.0217	10.74	1.00	10.74
10-06-2021	NNTK2 - S3-R5-1	2251.31	165.36	2085.95	1.1333	1.1075	0.0258	12.36	1.00	12.36
10-06-2021	NNTK2 - S1-R5-1	2257.79	174.22	2083.57	1.1458	1.1179	0.0279	13.39	1.00	13.39
21-07-2021	NNTK2 - S2 R5-1	2207.72	149.87	2057.85	1.1341	1.1138	0.0203	9.85	1.00	9.85
21-07-2021	NNTK2 - S1 R5-1	2173.70	161.00	2012.70	1.1721	1.1351	0.0370	18.38	1.00	18.38
07-12-2021	NNTK2 - S3 R5-1	2282.54	164.04	2118.50	1.1253	1.1117	0.0136	6.41	1.00	6.41
05-01-2022	NNTK2 - S1 R5-1	1959.27	165.47	1793.80	1.1300	1.1157	0.0143	7.96	1.00	7.96
26-01-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2046.30	162.10	1884.20	1.1563	1.1286	0.0277	14.70	1.00	14.70
08-03-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2186.56	163.35	2023.21	1.1286	1.0915	0.0372	18.38	1.00	18.38
07-04-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2168.54	162.99	2005.55	1.1437	1.1308	0.0129	6.41	1.00	6.41
05-05-2022	NNTK2 - S1 R5-1	1568.91	157.49	1411.42	1.1416	1.1289	0.0127	8.97	1.00	8.97
07-06-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2158.20	167.10	1991.10	1.1604	1.1401	0.0204	10.22	1.00	10.22
05-07-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2107.19	163.80	1943.39	1.1330	1.1185	0.0146	7.50	1.00	7.50
03-08-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2194.62	154.97	2039.65	1.1636	1.1183	0.0452	22.18	1.00	22.18
25-08-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2125.61	171.31	1954.30	1.1438	1.1256	0.0182	9.32	1.00	9.32
20-10-2022	NNTK2 - S1 R5-1	1986.13	165.95	1820.18	1.1246	1.1024	0.0223	12.23	1.00	12.23
21-11-2022	NNTK2 - S1 R5-1	1936.64	153.86	1782.78	1.1529	1.1399	0.0130	7.30	1.00	7.30
11-12-2022	NNTK2 - S1 R5-1	2062.40	164.74	1897.66	1.1379	1.1207	0.0172	9.05	1.00	9.05

Anexo 5.- Parámetros determinación CSS – Aforo El Yeso.

Fecha	Ubicación	P _{muestra-bruto} [g]	P _{recipiente} [g]	P _{muestra-neto} [g]	P _{filtro-bruto} [g]	P _{filtro} [g]	P _{sedimento-neto} [g]	C ₁ [ppm]	Factor	CSS [mg/L]
05-01-2022	NNTK2 - S_Y_Puente-R5-1	757.21	161.11	596.10	1.4877	1.1047	0.3831	642.59	1.00	642.85
05-01-2022	NNTK2 - S_Y_Rojo-R5-1	1158.67	164.11	994.56	1.1311	1.0947	0.0364	36.59	1.00	36.59
05-01-2022	NNTK2 SY-DGA R5-1	1704.10	167.90	1536.20	3.3564	1.1283	2.2281	1450.40	1.00	1451.71
26-01-2022	AFORO -RF-R1-2	1984.57	161.92	1822.65	2.4517	1.0889	1.3629	747.74	1.00	748.08
26-01-2022	AFORO -RF-R1-2	2069.40	160.70	1908.70	3.7481	2.2330	1.5151	793.81	1.00	794.20

Anexo 6.- Parámetros determinación CSS – Río Juncalillo.

Fecha	Ubicación	P _{muestra-bruto} [g]	P _{recipiente} [g]	P _{muestra-neto} [g]	P _{filtro-bruto} [g]	P _{filtro} [g]	P _{sedimento-neto} [g]	C ₁ [ppm]	Factor	CSS [mg/L]
11-12-2020	NNTK1 - S1 R5-1	2230.3	149.9	2080.4	1.2425	1.1372	0.1053	50.62	1.00	50.62
06-08-2021	NNTK1 - S2-R5-1	2111.8	165.8	1946.0	1.3261	1.1334	0.1927	99.01	1.00	99.02
13-12-2021	NNTK1 - S1-R5-1	1841.4	164.1	1677.3	1.1556	1.1368	0.0188	11.20	1.00	11.20
13-12-2021	NNTK1 - S2 R5-1	1787.6	162.8	1624.8	1.1052	1.0793	0.0259	15.95	1.00	15.95
28-01-2022	NNTK1 - S1-R5-1	2053.1	163.2	1889.8	1.1546	1.1103	0.0443	23.46	1.00	23.46
28-01-2022	NNTK1 - S2 R5-1	1975.2	164.7	1810.5	1.1619	1.1243	0.0377	20.80	1.00	20.80
04-03-2022	NNTK1 - S2 R5-1	2069.1	164.9	1904.2	1.1479	1.1305	0.0174	9.13	1.00	9.13
04-03-2022	NNTK1 - S1-R5-1	2005.5	160.3	1845.2	1.1468	1.1186	0.0282	15.28	1.00	15.28
01-04-2022	NNTK1 - S2-R5-1	1823.0	165.4	1657.7	1.1096	1.0946	0.0151	9.13	1.00	9.13
01-04-2022	NNTK1 - S1-R5-1	2071.7	161.26	1910.44	1.1501	1.1210	0.0291	15.22	1.00	15.22
25-05-2022	NNTK1 - S2 R5-1	1916.2	145.2	1771.0	1.1531	1.1314	0.0216	12.22	1.00	12.22
25-05-2022	NNTK1 - S1-R5-1	1964.7	163.16	1801.54	1.1271	1.1160	0.0110	6.12	1.00	6.12
07-09-2022	NNTK1 - S2 R5-1	1915.96	158.5	1757.4	1.2895	1.1419	0.1475	83.93	1.00	83.94
07-09-2022	NNTK1 - S1 R5-1	2058.6	150.7	1908.0	1.2896	1.1219	0.1676	87.87	1.00	87.87
06-10-2022	NNTK1 - S2 R5-1	2035.4	156.5	1878.9	1.2085	1.0923	0.1162	61.83	1.00	61.84
06-10-2022	NNTK1 - S1 R5-1	2146.0	170.1	1975.9	1.2727	1.1376	0.1350	68.35	1.00	68.35
10-11-2022	NNTK1 - S2 R5-1	1958.8	162.9	1795.8	1.3567	1.1163	0.2405	133.90	1.00	133.91
10-11-2022	NNTK1 - S1 R5-1	1972.2	163.1	1809.1	1.3440	1.1342	0.2098	116.00	1.00	116.00
06-12-2022	NNTK1 - S2 R5-1	2078.7	152.7	1926.0	1.1886	1.1162	0.0724	37.57	1.00	37.58
06-12-2022	NNTK1 - S1 R5-1	1829.3	163.7	1665.6	1.1998	1.1450	0.0548	32.92	1.00	32.92
-	Agua río Instrum M2	2119.9	150.9	1969	1.1234	1.1065	0.0169	8.58	1.00	8.58
-	Agua río Instrum M1	2088.3	150.7	1937.6	1.1401	1.1237	0.0163	8.43	1.00	8.43
-	Agua río arriba M1	2098.9	151.5	1947.4	1.1413	1.1247	0.0166	8.53	1.00	8.53

A.3.- Filtros posts filtrados

A continuación, se presentan fotografías de los filtros posterior al filtrado. Del A7 hasta el A25 corresponden a las muestras realizadas en el Embalse El Yeso, del A26 hasta el A30 corresponden a las muestras realizadas en el Aforo El Yeso y del A31 hasta el A53 corresponden a las muestras realizadas en el Río Juncalillo.



**Anexo 7.- Filtro muestra 07/06/2021
NNTK2 - S2 R5-1.**



**Anexo 8.- Filtro muestra 07/06/2021
NNTK2 - S1 R5-1.**



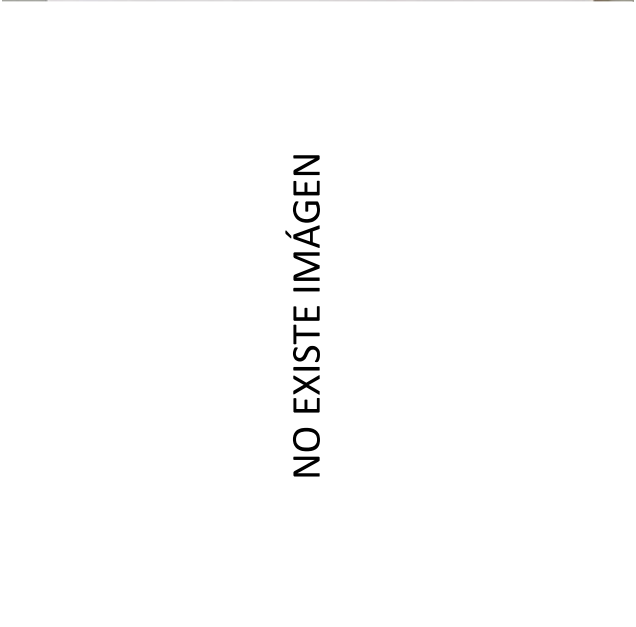
**Anexo 9.- Filtro muestra 10/06/2021
NNTK2 - S3 R5-1.**



**Anexo 10.- Filtro muestra 10/06/2021
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 11.- Filtro muestra 21/07/2021
NNTK2 - S2 R5-1.**



**Anexo 12.- Filtro muestra 21/07/2021
NNTK2 - S1 R5-1.**

NO EXISTE IMÁGEN



**Anexo 13.- Filtro muestra 07/12/2021
NNTK2 - S3 R5-1.**



**Anexo 14.- Filtro muestra 05/01/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



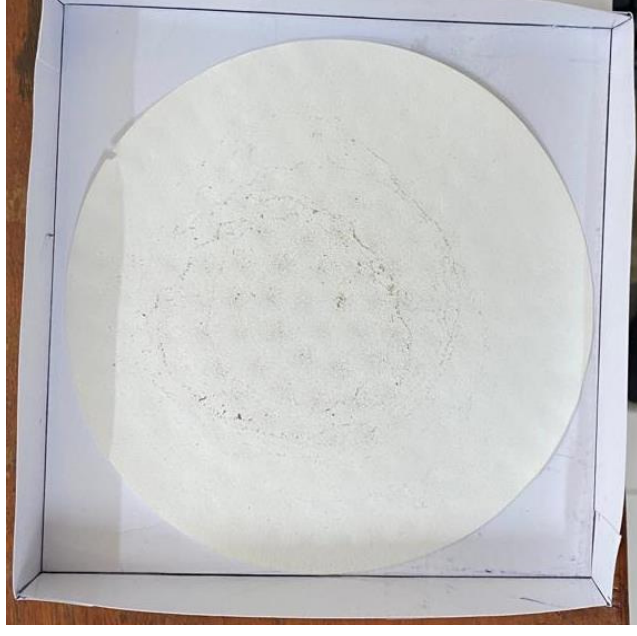
**Anexo 15.- Filtro muestra 26/01/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 16.- Filtro muestra 08/03/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 17.- Filtro muestra 07/04/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 18.- Filtro muestra 05/05/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 19.- Filtro muestra 07/06/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 20.- Filtro muestra 05/07/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 21.- Filtro muestra 03/08/2022
NNTK2 - S1 R5-1**



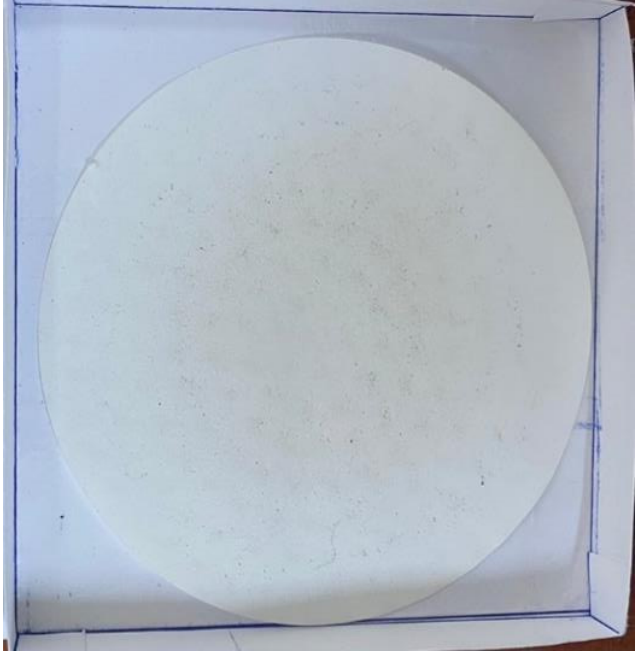
**Anexo 22.- Filtro muestra 25/08/2022
NNTK2 - S2 R5-1.**



**Anexo 23.- Filtro muestra 20/10/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 24.- Filtro muestra 21/11/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 25.- Filtro muestra 11/12/2022
NNTK2 - S1 R5-1.**



**Anexo 26.- Filtro muestra 05/01/2022
NNTK2 - S_Y_Puente-R5-1.**



**Anexo 27.- Filtro muestra 05/01/2022
NNTK2 - S_Y_Rojo-R5-1.**



**Anexo 28.- Filtro muestra 05/01/2022
NNTK2 - SY-DGA R5-1.**



**Anexo 29.- Filtro muestra 26/01/2022
Aforo - RF-R1-2.**



**Anexo 30.- Filtro muestra 26/01/2022
Aforo - RF-R1-2.**



**Anexo 31.- Filtro muestra 11/12/2020
NNTK1 - S1 R5-1.**



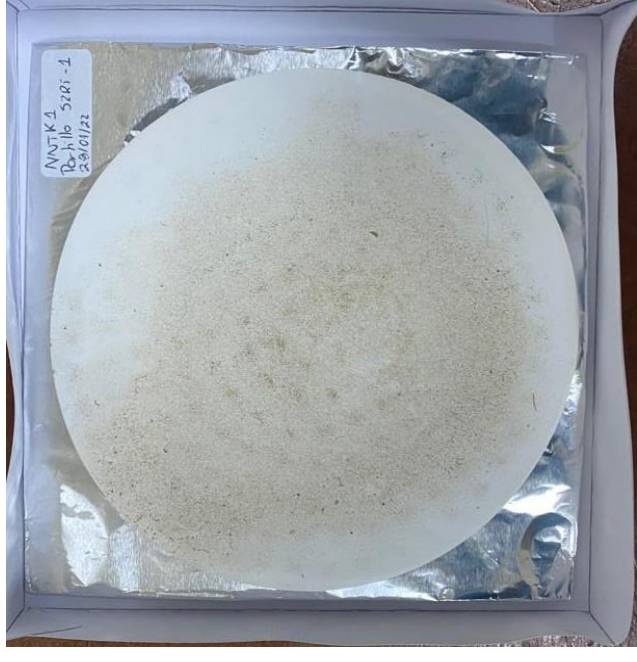
**Anexo 32.- Filtro muestra 06/08/2021
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 34.- Filtro muestra 13/12/2021
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 33.- Filtro muestra 13/12/2021
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 36.- Filtro muestra 28/01/2021
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 37.- Filtro muestra 04/03/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 38.- Filtro muestra 04/03/2022
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 39.- Filtro muestra 01/04/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 40.- Filtro muestra 01/04/2022
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 41.- Filtro muestra 25/05/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 42.- Filtro muestra 25/02/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 43.- Filtro muestra 07/09/2022
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 44.- Filtro muestra 07/09/2022
NNTK1 - 21 R5-1.**



**Anexo 45.- Filtro muestra 06/10/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



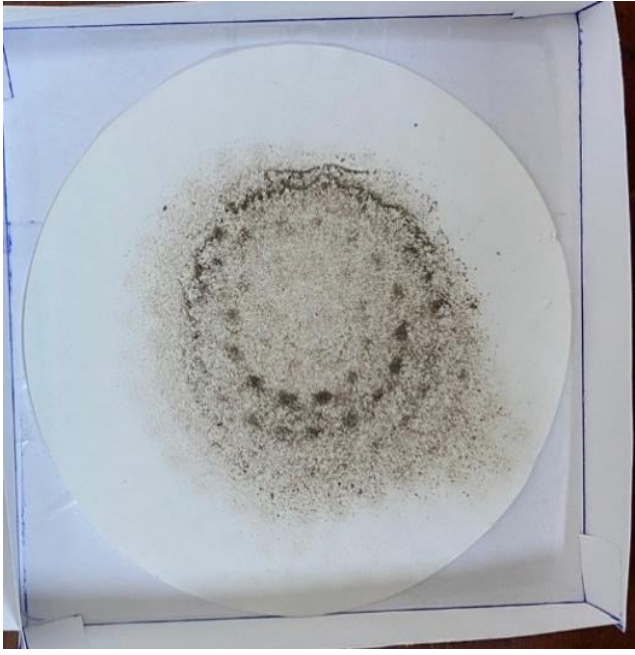
**Anexo 46.- Filtro muestra 06/10/2022
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 47.- Filtro muestra 10/11/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 48.- Filtro muestra 10/11/2022
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 49.- Filtro muestra 06/12/2022
NNTK1 - S2 R5-1.**



**Anexo 50.- Filtro muestra 06/12/2022
NNTK1 - S1 R5-1.**



**Anexo 51.- Filtro muestra Fecha Desconocida
Agua río Instrum M2.**



**Anexo 52.- Filtro muestra Fecha Desconocida
Agua río Instrum M1.**



**Anexo 53.- Filtro muestra Fecha Desconocida
Agua río arriba M1.**