

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE REGULACIÓN DEL CAUDAL EN UN ECOSISTEMA  
HÍDRICO A TRAVÉS DE LA ESTIMACIÓN DEL METABOLISMO DE CAUCE ABIERTO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR A LOS TÍTULOS DE  
INGENIERO CIVIL E INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**DANY ALEJANDRA HERNÁNDEZ MUÑOZ**

**ID: 000258104**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
ENERO DE 2019**

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE REGULACIÓN DEL CAUDAL EN UN ECOSISTEMA  
HÍDRICO A TRAVÉS DE LA ESTIMACIÓN DEL METABOLISMO DE CAUCE ABIERTO**

**PRESENTADO POR:  
DANY ALEJANDRA HERNÁNDEZ MUÑOZ  
ID: 000258104**

**DIRECTORAS ACADÉMICAS  
ALEXANDRA CERÓN VIVAS, PH.D  
SANDRA ROCÍO VILLAMIZAR AMAYA, PH.D**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
ENERO DE 2019**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

Firma Presidente del Jurado

---

Firma Jurado N°1

---

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Enero de 2019

## DEDICATORIA

*A Dios, por haberme permitido llegar a este momento con salud para lograr mis objetivos, además de darme la fortaleza necesaria en todo momento.*

*A mis padres, Esperanza y Jaime, por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, por confiar en mí, por su constante apoyo en todas mis actividades y por los ejemplos de perseverancia y constancia que me han infundido siempre.*

*A mis hermanos, Jaime y Jeison, por su motivación constante y por sus consejos que me han permitido ser una mejor persona cada día.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecerle a Dios por haberme permitido culminar mis estudios y mi proyecto de grado. A mis directoras, la Dra. Sandra Rocío Villamizar Amaya y la Dra. Alexandra Cerón Vivas por el tiempo que me han brindado, por sus aportes, paciencia, recomendaciones para el desarrollo y culminación de este trabajo, y por su inmenso respaldo desde el inicio hasta el final.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por contribuir en mi formación tanto profesional como personal. A los profesores que a lo largo de la carrera me compartieron sus conocimientos y orientaciones.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCION .....	1
2 OBJETIVOS .....	2
2.1 Objetivo general .....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3 JUSTIFICACIÓN .....	3
4 MARCO TEÓRICO.....	4
4.1 Efectos de la regulación de caudal .....	5
4.2 Base teórica para la estimación del metabolismo de cauce abierto .....	6
4.2.1 Oxígeno como sustituto del dióxido de carbono en la estimación del MCA .....	6
4.2.2 Estimación de la difusión de oxígeno.....	8
4.2.3 Parámetros de respuesta de metabolismo, GPP, ER y NEM. ....	9
5 METODOLOGÍA.....	11
5.1 Descripción del área de estudio .....	11
5.2 Descripción del cálculo de metabolismo .....	13
5.3 Datos requeridos .....	15
5.3.1 Radiación solar .....	16
5.3.2 Presión atmosférica .....	19
5.3.3 Caudal, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica .....	22
5.4 Descripción del modelo “BASE” .....	25
5.5 Estrategias para el análisis de los resultados obtenidos.....	26
5.5.1 Verificación de datos estadísticos .....	26
5.5.2 Análisis del caudal vs otros parámetros. ....	28

6	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	30
6.1	Tipos de pulsos o entregas de caudal en el período 2010-2018.....	30
6.1.1	Pulsos o entregas de caudal en el año 2011.....	32
6.1.2	Pulsos o entregas de caudal en el período 2012-2013 .....	33
6.1.3	Pulsos o entregas de caudal en el período 2014-2015 .....	34
6.2	Evaluación del ajuste de los resultados de MCA .....	35
6.2.1	Evaluación de la convergencia de forma visual.....	36
6.3	Relación de los estimativos de metabolismo de cauce abierto (MCA) y el caudal. ....	38
6.4	Discusión.....	47
7	CONCLUSIONES.....	49
8	GLOSARIO Y ABREVIATURAS.....	50
9	BIBLIOGRAFÍA .....	53
10	ANEXOS .....	58
10.1	Anexo 1: entrada a BASE.....	58
10.2	Anexo 2: Output de BASE .....	58
10.3	Anexo 3: Datos auxiliares.....	58

## TABLA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Respiración celular y fotosíntesis. ....	7
Figura 2. Dinámica de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en cuerpos hídricos. ....	8
Figura 3. Metabolismo neto del ecosistema. ....	10
Figura 4. Tramo en restauración del río San Joaquín.....	13
Figura 5. Procedimiento general para obtener estimativos diarios de MCA.....	16
Figura 6. Procedimiento general para estimaciones de PAR.....	18
Figura 7. Metodología general para obtener datos de presión atmosférica .....	21
Figura 8. Metodología general para obtener datos de caudal, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (flujo, temp, doxy, spcon) .....	24
Figura 9. Metodología general para obtener datos MCA .....	26
Figura 10. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el período 2010-2018.....	31
Figura 11. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el año 2011. ....	32
Figura 12. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el período 2012-2013.....	34
Figura 13. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el período 2014-2015.....	35
Figura 14. Ejemplo de gráficos convergentes y modelo de OD con buen ajuste .....	37
Figura 15. Ejemplo de gráficos no convergentes y modelo de OD con mal ajuste .....	37
Figura 16. Serie de tiempo de tasas metabólicas diarias y datos auxiliares para el período 2010-2018.....	41



## LISTA DE MAPAS

	Pág.
Mapa 1. Localización general del área de estudio.....	12
Mapa 2. Localización geográfica de la estación de monitoreo 105 de Radiación Solar en el sitio web CIMIS. ....	17
Mapa 3. Localización geográfica de la estación Fresno Air Terminal sitio web MesoWest. ....	20
Mapa 4. Localización geográfica de la estación GRF.....	22

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de estadísticos provistos por BASE. ....	27
Tabla 2. Número de días que fallan la verificación de estadísticos.....	36
Tabla 3. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal primer pulso fenómeno de La Niña. ....	42
Tabla 4. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulsos pequeños de otoño 2011, 2012 y 2013.....	43
Tabla 5. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulsos pequeños de 2012 y 2013. ...	44
Tabla 6. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulsos prolongados de 2014 y 2015.	45
Tabla 7. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulso prolongado de 2014 (antes, durante y después). ....	46

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE REGULACIÓN DEL CAUDAL EN UN ECOSISTEMA HÍDRICO A TRAVÉS DE LA ESTIMACIÓN DEL METABOLISMO DE CAUCE ABIERTO.

**AUTOR(ES):** Dany Alejandra Hernández Muñoz

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Ambiental  
Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Alexandra Cerón Vivas  
Sandra Rocío Villamizar Amaya

### RESUMEN

Los diferentes datos disponibles a través de los sitios web de diferentes agencias, como datos de calidad de agua, caudal y otros datos auxiliares, pueden utilizarse con el fin de obtener información sobre los procesos clave dentro de un ecosistema fluvial. Este proyecto ejemplifica el caso de un tramo en restauración del río San Joaquín en California (EE.UU) en el que este tipo de información fue utilizada para obtener estimativos de metabolismo de cauce abierto (MCA), buscando analizar si los pulsos de caudal relacionados con el proceso de restauración tienen algún efecto en los estimativos de MCA del tramo. Dentro de la metodología se describen los pasos para adquirir y procesar datos de cantidad y calidad del agua (caudal, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad) y datos meteorológicos necesarios. Se utilizó una herramienta Bayesiana para la estimación del MCA (BASE), obteniendo valores diarios de GPP, ER, y NEM para el período 2010-2018. La variabilidad en el caudal a lo largo del período de estudio no permitió generalizar un comportamiento autotrófico o heterotrófico para el sistema, sino una dinámica de respuesta del tramo a los tipos de pulsos de caudal. Tanto el caudal como la calidad del agua en cada uno de los pulsos analizados influenciaron las tasas de MCA en el tramo.

### PALABRAS CLAVE:

MCA, GPP, ER, ecosistema fluvial, regulación de caudal.

### V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** ANALYSIS OF THE EFFECTS OF FLOW REGULATION ON A RIVER ECOSYSTEM THROUGH ESTIMATION OF WHOLE-STREAM METABOLISM

**AUTHOR(S):** Dany Alejandra Hernández Muñoz

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Ambiental  
Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Alexandra Cerón Vivas  
Sandra Rocío Villamizar Amaya

### ABSTRACT

The different data available through agency websites, such as water quality data, flow and other auxiliary data, may be used to obtain information on the key processes within a river ecosystem. This project exemplifies the case of a restoration reach along the San Joaquín River in California (USA) in which such information was used to obtain estimates of open channel metabolism (MCA), seeking to analyze whether the flow pulses defined by the restoration effort had some effect on MCA estimates within the reach. As part of the methodology, this document describes the steps to acquire and process water quantity and quality data (flow, dissolved oxygen, temperature and specific conductivity) and necessary meteorological data. A Bayesian tool (BASE) was used to estimate the MCA, obtaining daily values of GPP, ER, and NEM for the period 2010-2018. The variability in the flow rate during the study period did not allow to generalize an autotrophic or heterotrophic behavior for the system, but rather a series of responses of the reach to the different types of flow pulses. Both flow rate and water quality influenced the MCA estimates within the restoration reach.

### KEYWORDS:

MCA, GPP, ER, river ecosystem, flow regulation.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

# 1 INTRODUCCION

La regulación del caudal de los ríos y otros factores antropogénicos como la invasión de corredores ribereños para usos agropecuarios o urbanos, han provocado la degradación de los ecosistemas fluviales afectando así el normal desarrollo de especies nativas (Poff et al., 2010). Por ejemplo, el cambio en la temperatura del agua (usualmente, el aumento) y de la distribución granulométrica del sedimento de los ríos en áreas de desove, han provocado una disminución significativa de la eficiencia de los procesos de incubación y emergencia en algunas especies de peces migratorios (Lake, 2003). Con el fin de mejorar, e incluso recuperar estos ecosistemas estratégicos, se han iniciado proyectos de trabajo conjunto entre investigadores y administradores del agua. Uno de los objetivos principales de estos tipos de proyectos es la definición de caudales apropiados que permitan la regeneración de estos ecosistemas estratégicos (Poff et al., 2010). El proyecto de restauración de un tramo del río San Joaquín en California (EE.UU.) ejemplifica la problemática presentada y los esfuerzos interinstitucionales para buscar la recuperación de condiciones físico-químicas del río que permitan el retorno de una especie específica de salmón (Chinook). El factor limitante en este proyecto es el caudal, dada la alta demanda del agua para usos agrícolas y urbanos de toda la zona del valle central de California.

Este trabajo de grado se centra en la estimación del metabolismo de cauce abierto (MCA) para evaluar la respuesta del ecosistema hídrico ante los esfuerzos de restauración en forma de “pulsos” de caudal que se liberan desde la represa Friant (límite superior del tramo de restauración) en épocas específicas del ciclo de vida de la especie de salmón Chinook. La hipótesis de trabajo es que, si los pulsos de caudal que se han efectuado son suficientes en el marco del proceso de restauración, se debería ver el efecto de dichos pulsos en la dinámica del metabolismo de cauce abierto del tramo en evaluación.

Este documento describe el modelo y los datos requeridos para la estimación de metabolismo de cauce abierto, incluidas las fuentes de datos y los procesos necesarios para su uso; luego, se propone un flujo de trabajo general que integra los componentes necesarios para la adquisición y procesamiento de datos para generar estimaciones diarias de metabolismo utilizando un conjunto de scripts R para su ejecución y finalmente se describen las estrategias para el análisis de los resultados. Para una mejor comprensión de este documento, al final se proporciona la sección de glosario y abreviaturas (Página 50).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Analizar los efectos de regulación del caudal en el río San Joaquín, California, en el tramo comprendido entre el lago Milerton y la desembocadura del río Merced, a través de la estimación del metabolismo de cauce abierto (*open-channel whole-stream metabolism*).

### 2.2 Objetivos específicos

- Determinar las conexiones existentes entre los estimativos de metabolismo y parámetros de calidad y cantidad de la corriente hídrica.
- Aplicar el método indirecto para el cálculo de metabolismo en el tramo de interés, utilizando información secundaria obtenida de diferentes fuentes oficiales (académicas y gubernamentales).
- Determinar la relación de dependencia entre los pulsos de caudal realizados en el tramo de estudio y los estimativos de metabolismo obtenidos mediante el uso de herramientas estadísticas.

### 3 JUSTIFICACIÓN

La regulación de los ríos, en conjunto con actividades antrópicas intensivas en sus cuencas aferentes, han conducido a la reducción e incluso a la desaparición de ecosistemas hídricos (Malmqvist & Rundle, 2002; Poff et al., 2010). En la actualidad, administradores del recurso hídrico e investigadores han hecho intentos por recuperar parcialmente estos ecosistemas, trabajando hacia la definición de caudales ambientales adecuados (Acreman & Dunbar, 2004; Poff et al., 2010). Este es el caso del río San Joaquín en California (EE.UU.), aguas abajo de la represa Friant, donde el efecto de la regulación del río, con fines de provisión de riego para actividades intensivas de agricultura, produjo múltiples afectaciones en el ecosistema hídrico (Furman, 1989). En el marco de este proceso de restauración (San Joaquin River Restoration Program, 2015), se está llevando a cabo una campaña muy grande de recopilación de datos que abarca agua superficial, aguas subterráneas e información pesquera. Esta información se convierte en una oportunidad única para realizar análisis desde diferentes áreas del conocimiento por la alta resolución espacial y temporal de los datos recolectados.

Ante la pregunta de si la estrategia de restauración está siendo efectiva, se han propuesto diferentes estrategias de verificación entre las que están la observación directa de los datos de calidad de agua o el seguimiento de ejemplares de peces salmón de la especie Chinook que retornan al río para su fase de desove. Esta propuesta busca evaluar si los estimativos de MCA pueden servir como indicador en el proceso de restauración de la corriente hídrica en términos de la respuesta del ecosistema a los pulsos de caudal que se han propuesto.

Se desarrolla este trabajo para un tramo del río San Joaquín en California (EE.UU.) dado que el proceso de restauración que se lleva a cabo ofrece la oportunidad de tener series históricas de todos los parámetros requeridos para la estimación del MCA. Una estrategia similar a la utilizada en este trabajo de grado se podría aplicar a una corriente colombiana dado el caso de que se contara con la información especificada dentro de la metodología de este documento.

## 4 MARCO TEÓRICO

Los ecosistemas lóticos (ríos y arroyos) ofrecen servicios básicos para la sociedad; por lo tanto, es importante lograr su desarrollo sostenible con el fin de reducir las afectaciones que se pueden ocasionar por perturbaciones naturales (sequías o crecidas) o antrópicas (extracción de agua, presencia de efluentes de aguas residuales etc.) (Alan Yeakley et al., 2016; Rodríguez, 2010). En este contexto, a través de los años, se ha evaluado la salud de las corrientes hídricas mediante el análisis de diferentes componentes estructurales de dichos ecosistemas. Estos componentes se pueden clasificar en dos tipos principales: la caracterización o el monitoreo de las propiedades físico-químicas del agua (calidad y cantidad) y el estudio de la estructura y composición de sus comunidades (algas, macrófitas, peces, etc.) (Rodríguez, 2010; R. G. Young, Matthaei, & Townsend, 2008). Sin embargo, en algunas ocasiones estos métodos resultan ineficientes o insuficientes a la hora de evaluar la funcionalidad ecológica de estos ecosistemas. Por esta razón, se han propuesto diferentes métodos como el cálculo del metabolismo de los ecosistemas hídricos y de las tasas de descomposición de la materia orgánica, que son buenos mecanismos para determinar el grado de funcionalidad de un ecosistema (Rodríguez, 2010). El metabolismo de los ecosistemas fluviales es una medida de la cantidad de carbono orgánico que se produce y consume en ellos, proporcionando una estimación directa de su base energética, lo que determina su capacidad de soporte vital (R. G. Young et al., 2008).

Las mediciones de MCA son representativas teniendo en cuenta que cubren todos los tipos de hábitat presentes, proporcionan una evaluación directa del equilibrio entre la oferta y la demanda de energía en los ecosistemas fluviales y, por lo tanto, dan una indicación de la base alimenticia del ecosistema (Rodríguez, 2010). Los parámetros más importantes derivados de las mediciones del metabolismo del ecosistema son la productividad primaria bruta (*gross primary productivity*, GPP) y la respiración del ecosistema (*ecosystem respiration*, ER) (Young, Townsend, & Matthaei, 2004). La combinación de estos dos parámetros, proveen una estimación de la cantidad de carbono orgánico que se produce y consume en los ríos, donde las algas y otras plantas acuáticas (autótrofos) son responsables de la producción primaria (GPP), mientras que ER mide las tasas de respiración de toda la comunidad del ecosistema, incluyendo organismos autótrofos y heterótrofos (R. G. Young et al., 2008). Si GPP es igual o superior a ER, la materia orgánica producida dentro del sistema probablemente está apoyando la cadena alimentaria, mientras que si ER excede en gran medida a GPP, entonces la materia orgánica de aguas arriba o la cuenca



circundante se está utilizando para mantener el ecosistema (R. Young, Collier, Waikato, & Strickland, 2006).

GPP depende de varios factores que incluyen la intensidad de la luz, la densidad óptica del agua, la temperatura del agua, el dióxido de carbono y la disponibilidad de nutrientes. ER, que a menudo se supone constante, depende de la disponibilidad de oxígeno y nutrientes. La combinación de estos dos procesos puede producir fuertes efectos diarios y estacionales en las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) y dióxido de carbono (Cox, 2003). Si se requiere utilizar las tasas de GPP y ER para identificar impactos ambientales, es necesario conocer la variación de ambas tasas en el espacio y en el tiempo en modo natural y en combinación con impactos antrópicos (Rodríguez, 2010).

Para un ecosistema particular, existen factores que determinan la variabilidad de los estimativos de MCA dado que GPP y ER son sensibles a factores ambientales como por ejemplo la cobertura forestal, presencia de nutrientes, contaminación orgánica y régimen de caudales (Rodríguez, 2010). Por ejemplo, en zonas agrícolas, la eliminación de la vegetación ribereña aumenta la luz disponible dentro de las fuentes hídricas y genera un aumento en las tasas de GPP y ER, lo que proporciona una indicación de la capacidad probable de los ríos para eliminar y transformar los nutrientes del agua (Young et al., 2004). Sin embargo, el aumento de las concentraciones de sedimentos finos o alta turbidez tiende a contrarrestar los efectos positivos y conducen a disminuciones de GPP y ER en sitios donde la combinación de profundidad y turbidez del agua restringe la disponibilidad de luz en el lecho del río. En términos del régimen de caudal, los flujos extremadamente bajos y continuos disminuyen la conectividad con el hábitat, lo que promueve la pérdida de diversidad y la reducción de la biomasa, degradan la calidad del agua al aumentar su temperatura fuera de los rangos adecuados y aumentan el potencial de eventos de eutrofización (Naiman, Latterell, Pettit, & Olden, 2008).

#### **4.1 Efectos de la regulación de caudal**

La mayor parte de la descarga total de agua (77%) de los 139 sistemas fluviales más grandes de América del Norte, el norte de México, Europa y las repúblicas de la antigua Unión Soviética se ven afectadas de manera importante o moderada por la fragmentación de los ríos debido a la construcción de represas y a la regulación del agua resultante de la operación de embalses, transvases entre cuencas y del uso intensivo de agua para usos agrícolas, industriales y

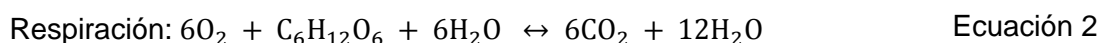
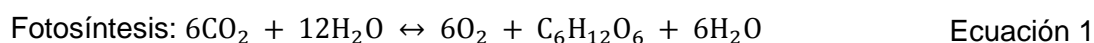
domésticos (Dynesius & Nilsson, 1994). Este tipo de alteraciones hidrológicas ha generado cambios en las estructuras y procesos de los ecosistemas lóticos en todo el mundo (Nilsson & Berggren, 2000). Entre las consecuencias más importantes están la reducción de la conectividad entre tramos de los ríos y alteraciones en las trayectorias de sucesiones ecológicas posteriores a los puntos de afectación. Adicionalmente, el proceso de regulación de caudal permite reducir típicamente los picos de inundación, y con ello la frecuencia y extensión de la inundación, siendo esto un fenómeno importante para mantener altos niveles de diversidad de hábitats (Ward & Stanford, 1995).

Los estudios sobre los ríos de flujo libre y regulado han despertado el interés sobre los efectos ambientales de las represas. En 1980, los ríos eran considerados como los elementos centrales en las cuencas, lo que le proporcionó más importancia a los ecosistemas ribereños, los cuales ocupan el ecotono entre las tierras altas y los reinos acuáticos, incluyendo gran variedad de comunidades. Estas áreas ribereñas ofrecen hábitats para diversas especies, que funcionan como filtros entre la tierra y el agua, y sirven como vías para dispersar y migrar organismos, pero a su vez, son sensibles a la variación en el ciclo hidrológico y sirven como indicador del efecto ambiental generado por las represas (Nilsson & Berggren, 2000). Otros efectos ambientales son graduales y sutiles, lo que los hace difíciles de predecir. Si un río está regulado, la extensión de la inundación y las cargas de nutrientes ciertamente cambiarán, pero la naturaleza exacta de estos cambios y sus magnitudes y períodos de tiempo a menudo siguen siendo imprevistos. Cada río es único en términos de sus patrones de flujo, los paisajes por los que fluye y las especies que soporta (Nilsson & Berggren, 2000).

## **4.2 Base teórica para la estimación del metabolismo de cauce abierto**

### **4.2.1 Oxígeno como sustituto del dióxido de carbono en la estimación del MCA**

La producción primaria involucra la captación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y proporciona al agua oxígeno ( $O_2$ ), mientras que la respiración del ecosistema es la inversa de esto, es decir, capta  $O_2$  y libera  $CO_2$  (Ecuación 1 y Ecuación 2) (Figura 1) (Young et al., 2004).



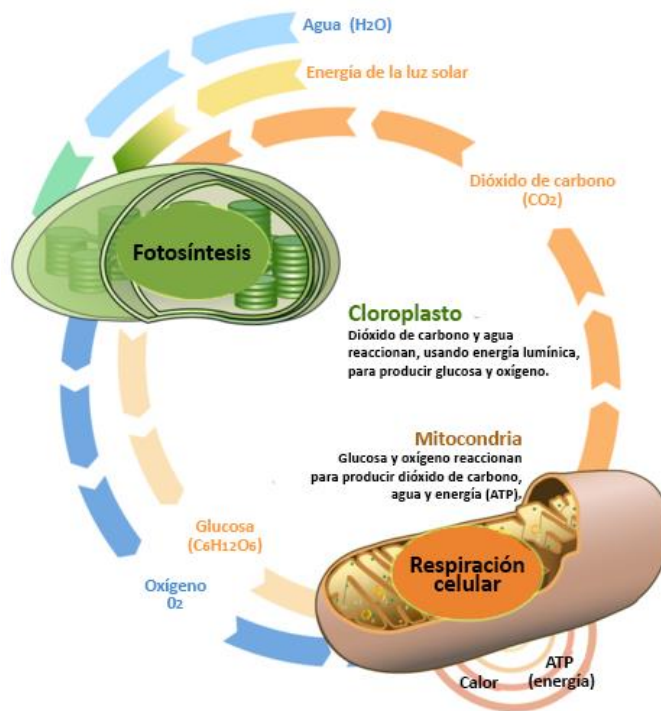


Figura 1. Respiración celular y fotosíntesis.

Fuente: (Harwood & Wilkin, 2016)

Dado que hay una relación 1:1 entre el consumo de  $CO_2$  y la producción de  $O_2$  en el proceso fotosintético, es viable medir las tasas de metabolismo del ecosistema utilizando cambios en las concentraciones de  $O_2$  o  $CO_2$  (Bott, Water, Brock, & Gregory, 1978). Debido a la dificultad de medir concentraciones de  $CO_2$  directamente en el agua, se ha utilizado mediciones del pH, que corresponden a las concentraciones de  $CO_2$ . Sin embargo, los estudios que se dedican a la estimación del metabolismo de cauce abierto en tramos de río usan mediciones de oxígeno disuelto (OD), ya que existe un desarrollo avanzado de sensores acuáticos para este propósito y es relativamente fácil obtener estimativos porque la magnitud del cambio de OD es generalmente grande (Young et al., 2004).

Como lo indica la ecuación de fotosíntesis, el oxígeno es un producto de este proceso, así que su concentración varía diariamente desde valores mínimos que ocurren temprano en la mañana (antes del amanecer), aumentan durante el día dado que las tasas de producción de oxígeno usualmente son mayores que las tasas de consumo por procesos respiratorios de la comunidad durante el fotoperiodo, llegan a un máximo en horas de la tarde, y empiezan a decrecer una vez las tasas de respiración de la comunidad sobrepasan las tasas de productividad durante la noche

(Figura 2).

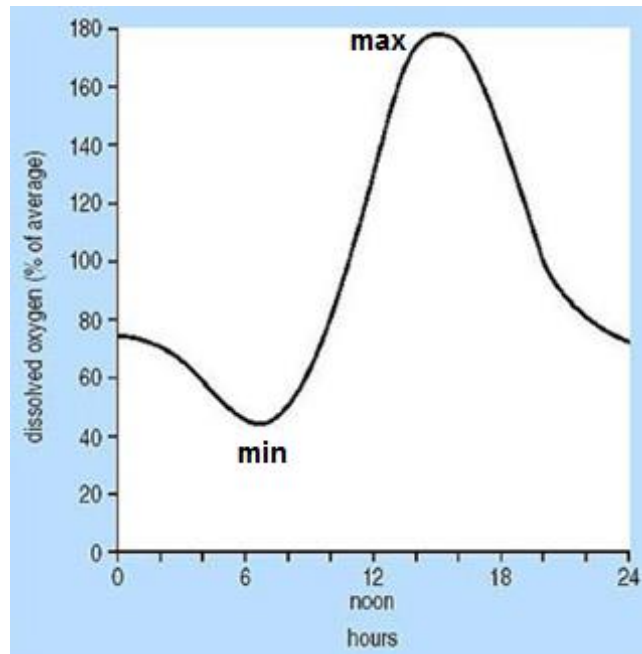


Figura 2. Dinámica de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en cuerpos hídricos.

Fuente: (The Open University, 2014)

#### 4.2.2 Estimación de la difusión de oxígeno

En sistemas abiertos las mediciones requieren una estimación de la cantidad de oxígeno que se difunde entre el agua y la atmósfera. En este contexto, hay dos técnicas para estimar las tasas de difusión de oxígeno. La primera utiliza información sobre los cambios en la concentración de OD durante la noche y también calcula simultáneamente la frecuencia respiratoria. Durante la oscuridad, la fotosíntesis se detiene y, por lo tanto, cualquier cambio en la concentración de OD se debe a la absorción por la respiración dentro del río o a la difusión de oxígeno a través de la superficie del río, como se representa en la siguiente ecuación (Ecuación 3):

$$\frac{dO}{dt} = -R \pm kD \quad \text{Ecuación 3}$$

donde  $dO/dt$  es la tasa de cambio de la concentración de OD,  $R$  es la tasa de captación de oxígeno (respiración) y  $kD$  representa la tasa de difusión de oxígeno a través de la superficie del río,  $k$  es el coeficiente de reaireación y  $D$  es el déficit o la diferencia de oxígeno entre la concentración de OD medida y la concentración saturada de OD.  $R$  tiene un signo negativo

delante porque la respiración siempre implica la captación de oxígeno, mientras que  $kD$  puede ser positivo (difusión de oxígeno en el río) o negativo (difusión de oxígeno fuera del río) dependiendo de si el agua está menos saturada con oxígeno o sobresaturada (Young et al., 2004).

Un segundo método para calcular el coeficiente de reaeración utilizando el registro de OD se basa en una solución matemática (Ecuación 4) (Mcbridel, 2002) de la ecuación que describe los cambios en la concentración de OD en un sitio durante un período de 24 horas. Esta solución matemática muestra que el coeficiente de reaeración depende de solo dos variables: el intervalo de tiempo entre el mediodía solar y el momento en que se produce el déficit mínimo de oxígeno disuelto, y la duración del período de luz del día (Chapra, 1991).

$$k = 7.5 \left( \frac{5.3\eta - \phi}{\eta\phi} \right)^{0.85} : \eta = \left( \frac{f}{14} \right)^{0.75} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde  $k$  es el coeficiente de reaeración a 20°C,  $\phi$  es el intervalo de tiempo entre el mediodía y el OD máximo,  $\eta$  es el factor de corrección del fotoperíodo y  $f$  es el número de horas del fotoperíodo. Este procedimiento funciona bien en ríos con un coeficiente de reaeración relativamente bajo, pero es muy sensible al error en el cálculo del retardo de tiempo en las corrientes con altos coeficientes de reaeración, que tendrán intervalos de tiempo cortos (Mcbridel, 2002).

#### 4.2.3 Parámetros de respuesta de metabolismo, GPP, ER y NEM.

La relación entre los parámetros  $GPP$  y  $ER$  ( $GPP/ER$  o  $P/R$ ) es un indicador de la disponibilidad alimentaria del río. Si  $GPP/ER > 1$ , el ecosistema es autótrofo, entonces el río tiene productividad primaria disponible para alimentar los niveles tróficos superiores, mientras que si  $GPP/ER < 1$ , el ecosistema es heterótrofo, lo que quiere decir que necesita insumos de materia orgánica de otras fuentes externas al tramo de estudio para poder alimentar las tasas de respiración del ecosistema (ODUM, 1956).

El metabolismo neto del ecosistema (*net ecosystem metabolism*, NEM) se calcula como la diferencia entre la producción primaria bruta y la respiración del ecosistema (es decir,  $NEM = GPP - ER$ ) (ver Figura 3). Este, se ha utilizado ampliamente como un indicador de la base alimentaria del tramo en estudio (Young et al., 2004). Estas mediciones se han utilizado para

indicar el cambio en la condición de los ríos siendo útiles para evaluar la restauración y recuperación de las fuentes hídricas degradadas (Gálvez, 2002; Seavy et al., 2009).

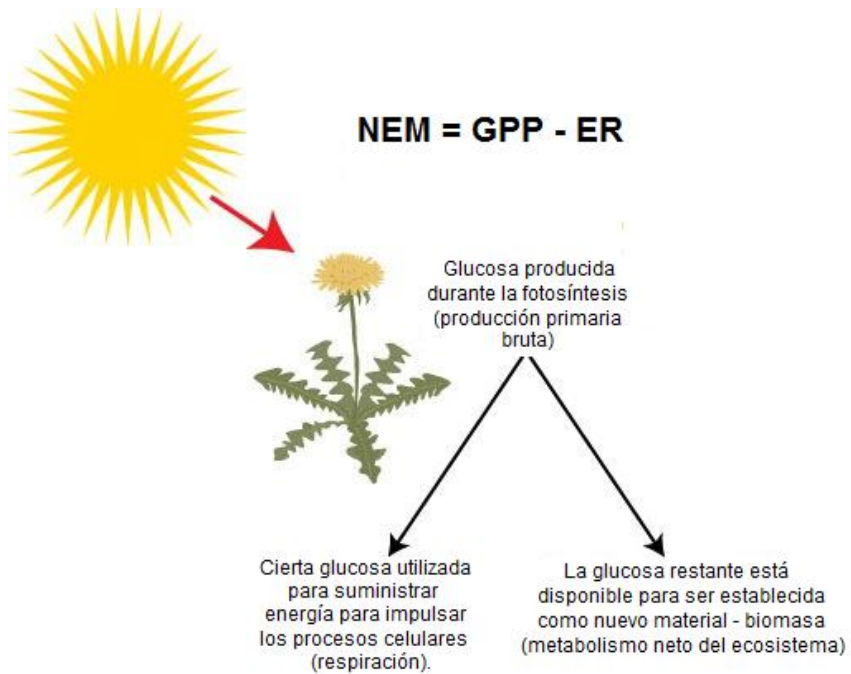


Figura 3. Metabolismo neto del ecosistema.

Fuente: (Major differences, 2014)

## 5 METODOLOGÍA

En las corrientes hídricas equipadas con sensores que muestrean continuamente datos de cantidad (caudal) y calidad (temperatura, OD y conductancia específica), los administradores del recurso e investigadores pueden usar el MCA para estudiar la respuesta de los ecosistemas de los ríos a cambios naturales y antropogénicos. Esta sección describe la estrategia usada para estimar el metabolismo de cauce abierto en un tramo del río San Joaquín (California, USA). Inicia con la descripción general del caso de estudio (sección 5.1), continúa con la descripción del método para el cálculo del metabolismo en cauce abierto incluyendo un flujo de trabajo que integra todos los componentes necesarios para la adquisición, el procesamiento y el análisis de datos utilizando un conjunto de código en el software R para su ejecución (sección 5.2), presenta en detalle las fuentes de información usadas y los procesos necesarios para prepararlos para su uso (sección 5.3); prosigue con la presentación de la herramienta BASE, usada para el cálculo del metabolismo de cauce abierto (sección 5.4), y finalmente, concluye con la descripción de las estrategias para el análisis de los resultados obtenidos (sección 5.5).

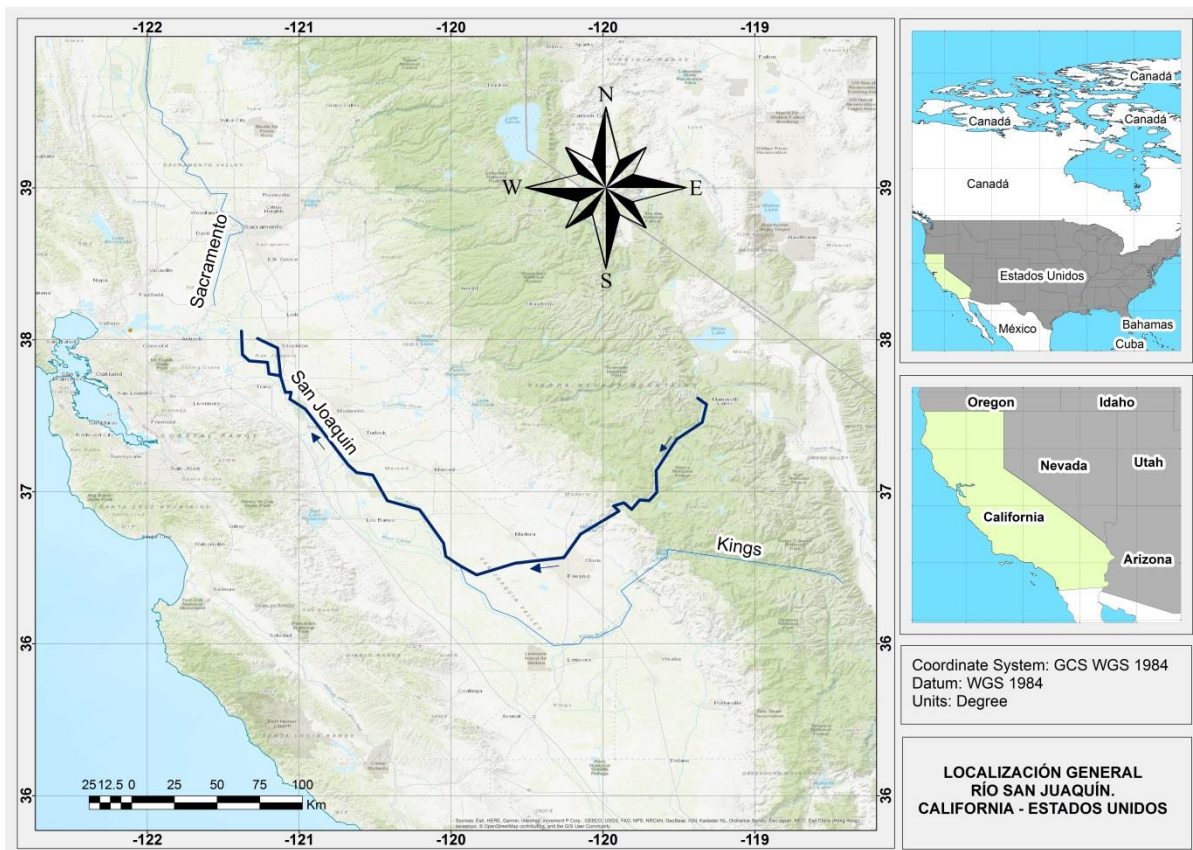
### 5.1 Descripción del área de estudio

El río San Joaquín tiene 530 km de longitud y es el segundo río más largo del estado de California, en Estados Unidos. El área de la cuenca hidrográfica a la que pertenece es de 83.000 km<sup>2</sup> y nace en lo alto de las vertientes oeste de la Sierra Nevada donde el río se forma a partir de tres bifurcaciones en dos lugares llamados Balloon Dome y Junction Butte. La bifurcación del norte comienza en el lado oeste de las montañas de la Sierra Nevada en las coordenadas 37,7286° N y 119.2440° W. La bifurcación media comienza en un lago llamado Thousand Island Lake en las coordenadas 37,6321 °N y 119.1579 °W y la bifurcación sur fluye desde Martha Lake en las coordenadas 37.0941 °N y 119.2434 °W (U.S. Board on Geographic Names, 2018). El río continúa hacia el oeste en el Valle Central de California, y se reorienta hacia el nor-oeste recibiendo los aportes de varios ríos que fluyen desde las montañas de la Sierra Nevada a 3352.8 m, hasta encontrarse con el río Sacramento, formando el Delta Sacramento-San Joaquín. En este lugar, el río San Joaquín se divide en dos ríos: el río Viejo y el río Medio (U.S. Board on Geographic Names, 2018) (Mapa 1).

La escorrentía de la nieve genera un mayor volumen de flujo en la cuenca, en Friant estos oscilaron desde 99.12 hasta 950 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, proporcionando al río históricamente características de

susceptibilidad a inundaciones en invierno y sequías en verano.

La cuenca se caracteriza por poseer alto grado de productividad y diversidad de hábitat, gracias a esto cuenta con un gran número y gran diversidad de plantas y animales. El corredor del río San Joaquín y las praderas adyacentes se sustentaron históricamente en grandes manadas de antílopes, osos pardos y otras especies; mientras que las planicies aluviales albergaron un gran número de aves acuáticas, costeras y el río apoyó a las poblaciones de salmones. Si bien el corredor fluvial todavía soporta grandes cantidades de vida silvestre, varias se han extinguido o han sido extirpadas del corredor del río San Joaquín. Las poblaciones de las especies restantes son mucho más pequeñas que las que se producían antes del desarrollo de la tierra y el agua (Users Authority & Defense Council, 2002).



Mapa 1. Localización general del área de estudio

El tramo en restauración es un tramo plano que se extiende desde la represa Friant localizada cerca de la ciudad de Fresno con una altitud de 97 m, hasta la desembocadura del río Merced en el río San Joaquín con una altitud de 17 m. La extensión total del tramo de restauración es de



246.2 km, divididos en subtramos de restauración (líneas con trazos color amarillo). Los datos usados para el análisis de MCA corresponden a la estación de monitoreo Gravelly Ford que es el punto de cierre del subtramo 1 de restauración (ver Figura 4).

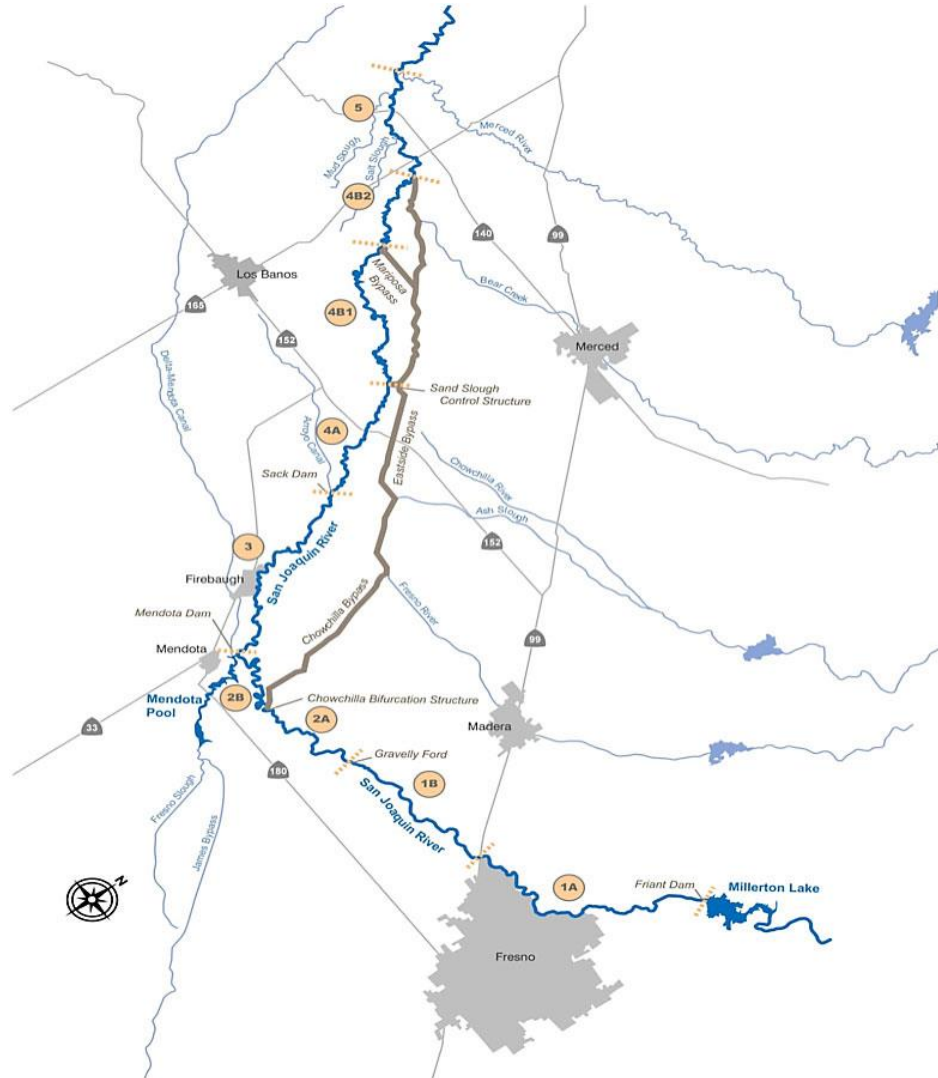


Figura 4. Tramo en restauración del río San Joaquín.  
Fuente: (U.S. Fish & Wildlife Service, 2017)

## 5.2 Descripción del cálculo de metabolismo

El método para el cálculo del metabolismo requiere la medición de la concentración de OD en el tiempo, en intervalos subsidiarios. Para cada intervalo, se realiza un balance de masa que tiene en cuenta los diferentes procesos que ocurren en el tramo en estudio (Ecuación 5) (ODUM, 1956)

así:

$$\frac{dC}{dt} = P - R - K_{O_2}D \quad \text{Ecuación 5}$$

donde  $C$  es la concentración de oxígeno disuelto ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ );  $P$  es la tasa de productividad primaria ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ );  $R$  es la tasa de respiración del ecosistema ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ );  $K_{O_2}$  es el coeficiente de reaeración ( $\text{d}^{-1}$ ); y  $D$  la diferencia entre la concentración medida de OD y la concentración correspondiente al 100% de saturación a una temperatura, salinidad y presión barométrica determinadas ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ ).

El coeficiente de reaeración se calcula a partir del método indirecto donde se incorpora la velocidad de reacción como un parámetro con la respiración y la tasa de producción primaria para ajustar el perfil de oxígeno disuelto medido (Ecuación 6) (Grace et al., 2015).

$$\frac{\Delta[O_2]_i}{\Delta t} = AI_i^p - R(\theta^{(T_i-T)}) + K_{O_2}(1.0241^{(T_i-T)})D_i \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $AI_i^p$  es el término de producción primaria,  $A$  es una constante que representa la producción primaria por cuanto de luz,  $I$  es la intensidad de la luz incidente en la superficie del agua, la cual representa la producción primaria por *quantum* de luz, y  $p$  es un exponente que refleja la capacidad de los productores primarios de utilizar la luz incidente y explica la saturación de la fotosíntesis. El subíndice  $i$  se refiere a los incrementos de tiempo en el perfil diario,  $T_i$  es la temperatura del agua en cada incremento de tiempo, y  $T$  es la temperatura media del agua durante el período de 24 horas. Se debe tener en cuenta que los valores de  $P$ ,  $R$  y  $K_{O_2}$  estimados están en función de la temperatura (Grace et al., 2015).

La dependencia de la temperatura tanto de la respiración como de la reaeración se adapta en la Ecuación 6, lo que genera mayor coincidencia entre las concentraciones de OD modeladas y medidas, particularmente cuando hay grandes cambios en la temperatura (Grace et al., 2015; Riley & Dodds, 2013). El factor de dependencia de la temperatura para la reaeración es 1.0241, mientras que el factor de dependencia de la temperatura para la respiración ( $\theta$ ) puede ser calculado como un parámetro más del modelo, o asumido como 1.072, valor que ha sido comúnmente aceptado en la literatura (Wilcock et al., 1998).

Con el fin de conocer los efectos de regulación del caudal en el río San Joaquín, se supone la

disponibilidad de diferentes tipos de información como datos de cantidad y calidad de agua e información meteorológica. Esta información se refiere a series temporales continuas (típicamente, intervalos de 15 minutos) de la descarga o caudal del río y datos de calidad del agua, específicamente, oxígeno disuelto, temperatura y conductancia específica (denominados respectivamente, doxy, temp y spcon en el código R desarrollado), los cuales son procesados mediante la herramienta BASE (Grace et al., 2015) que es útil para obtener series continuas de estimativos de MCA.

### **5.3 Datos requeridos**

El cálculo de MCA requiere diferentes tipos de datos que se han identificado a partir de la revisión bibliográfica preliminar (Grace et al., 2015; ODUM, 1956; Villamizar, Pai, & Harmon, n.d.). Entre ellos están los datos climatológicos (radiación activa fotosintética (PAR) y presión atmosférica) y los datos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en el río. Esta información, y otra que pueda ser relevante para el análisis, se obtuvieron a partir de fuentes de información oficiales académicas y gubernamentales, tales como CIMIS (California Irrigation Management Information System., 2015), MesoWest (University of Utah, 2015) y CDEC (California Department of Water Resources, 2015), para estaciones localizadas dentro del tramo de restauración del río.

El procedimiento general para obtener estimativos diarios continuos de MCA para una estación e información auxiliar útil para la interpretación de los resultados se resume en la Figura 5.

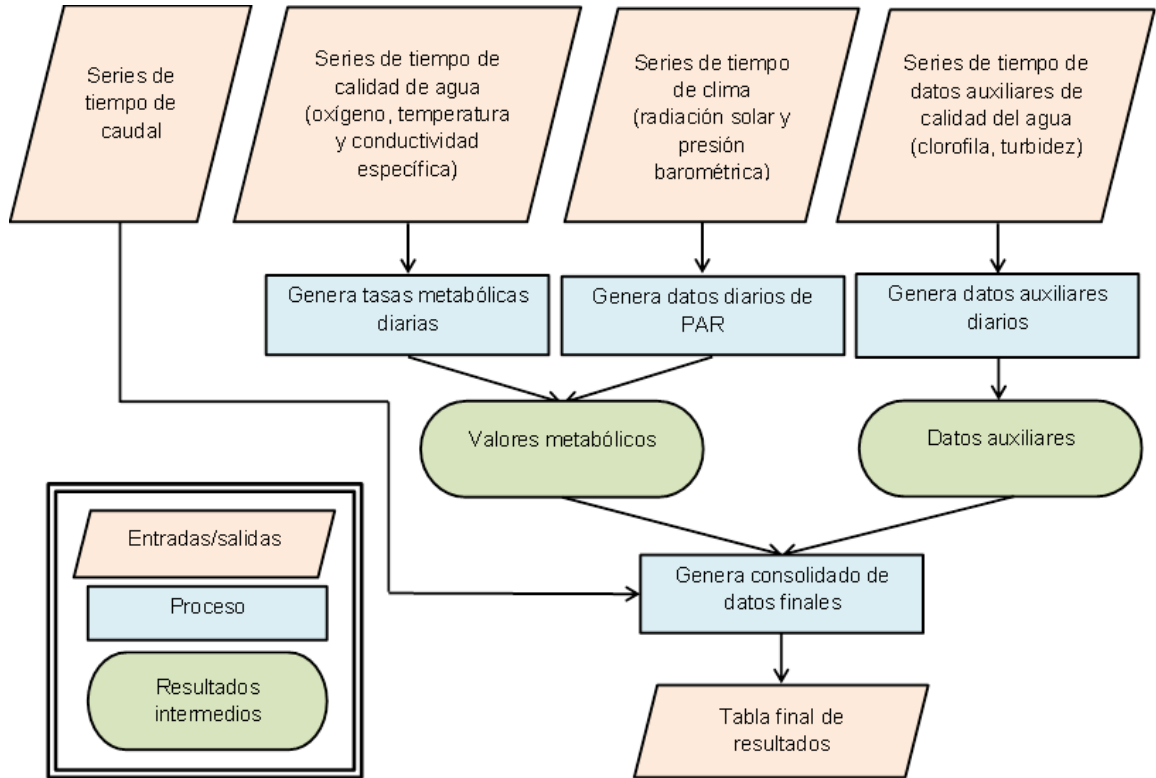


Figura 5. Procedimiento general para obtener estimativos diarios de MCA.

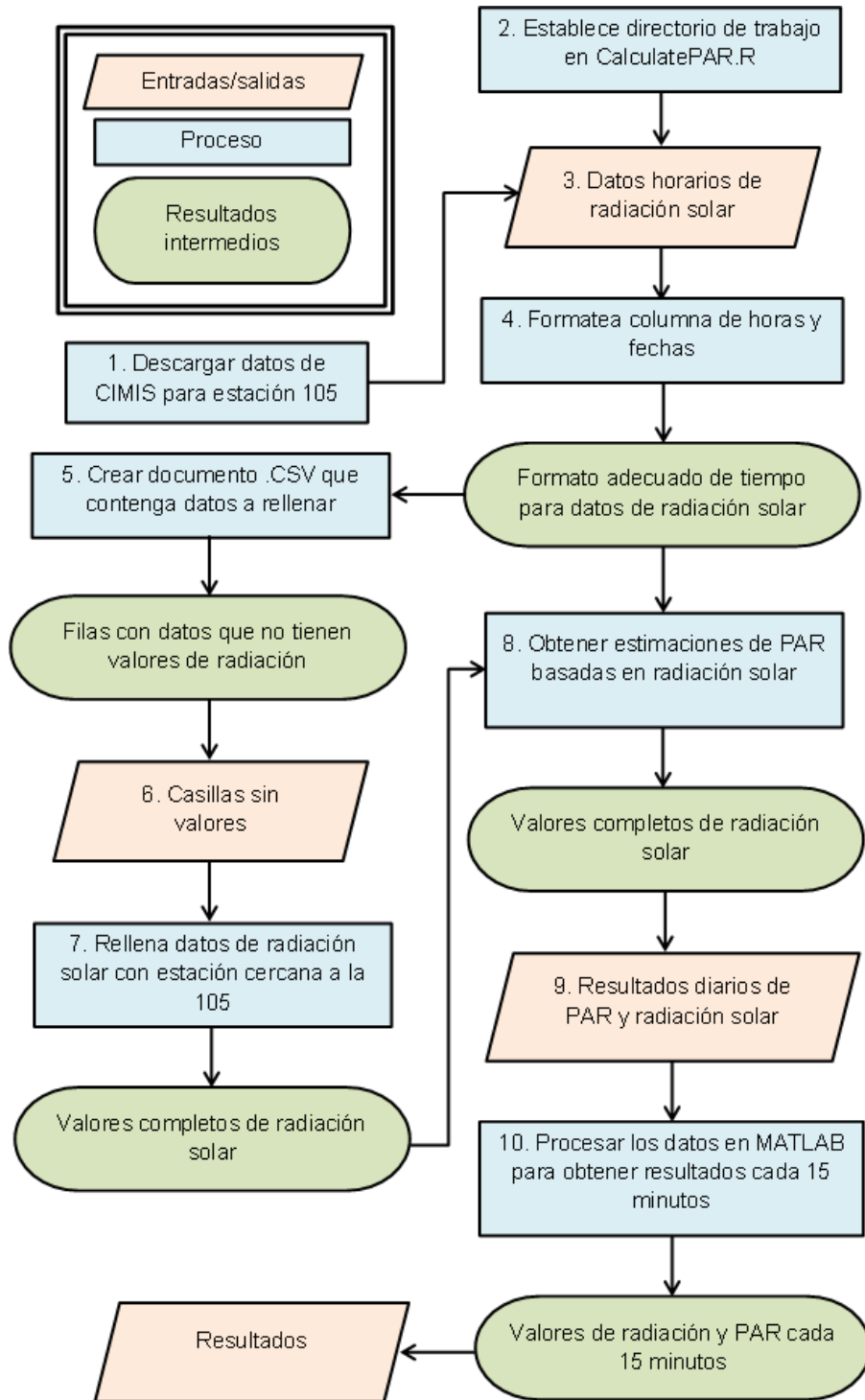
### 5.3.1 Radiación solar

La plataforma “California Irrigation Management Information System - (CIMIS)” administra una red de más de 145 estaciones meteorológicas automáticas en California. Para el desarrollo de este estudio la estación de interés es la 105 (Westlands), ubicada en las coordenadas 36°38’03”N y 120°22’55”O (Mapa 2). Los datos de esta estación son pertinentes dada la cercanía de esta al tramo de restauración y la homogeneidad topográfica del terreno (zona baja, plana) en la extensión del tramo de restauración.



Mapa 2. Localización geográfica de la estación de monitoreo 105 de Radiación Solar en el sitio web CIMIS.

El procedimiento para generar estimaciones de PAR para series de tiempo cada 15 minutos utilizando datos de radiación solar se muestra en la Figura 6.



**Figura 6. Procedimiento general para estimaciones de PAR.**

Para la estación 105 se realiza una descarga de datos horarios de radiación solar en dos paquetes: 2010-2014 (todos los días del año) y 2015-2018 (todos los días del año, excepto para 2018 donde solo se realizó una descarga de datos hasta el mes de marzo). Seguido de esto, se debe abrir el archivo de código (script) "CalculatePAR.R" y a editar el directorio de trabajo. La entrada para el código es una serie de tiempo cruda de radiación solar por hora. El script procesa el conjunto de datos para formatear las columnas de fecha y hora, y para identificar los intervalos de tiempo con datos faltantes, informando su posición dentro de la serie de tiempo. Se recurre a estaciones localizadas en áreas próximas a la estación 105 para generar los datos faltantes. Estos valores se ingresan al código para así completar la serie de tiempo de radiación solar.

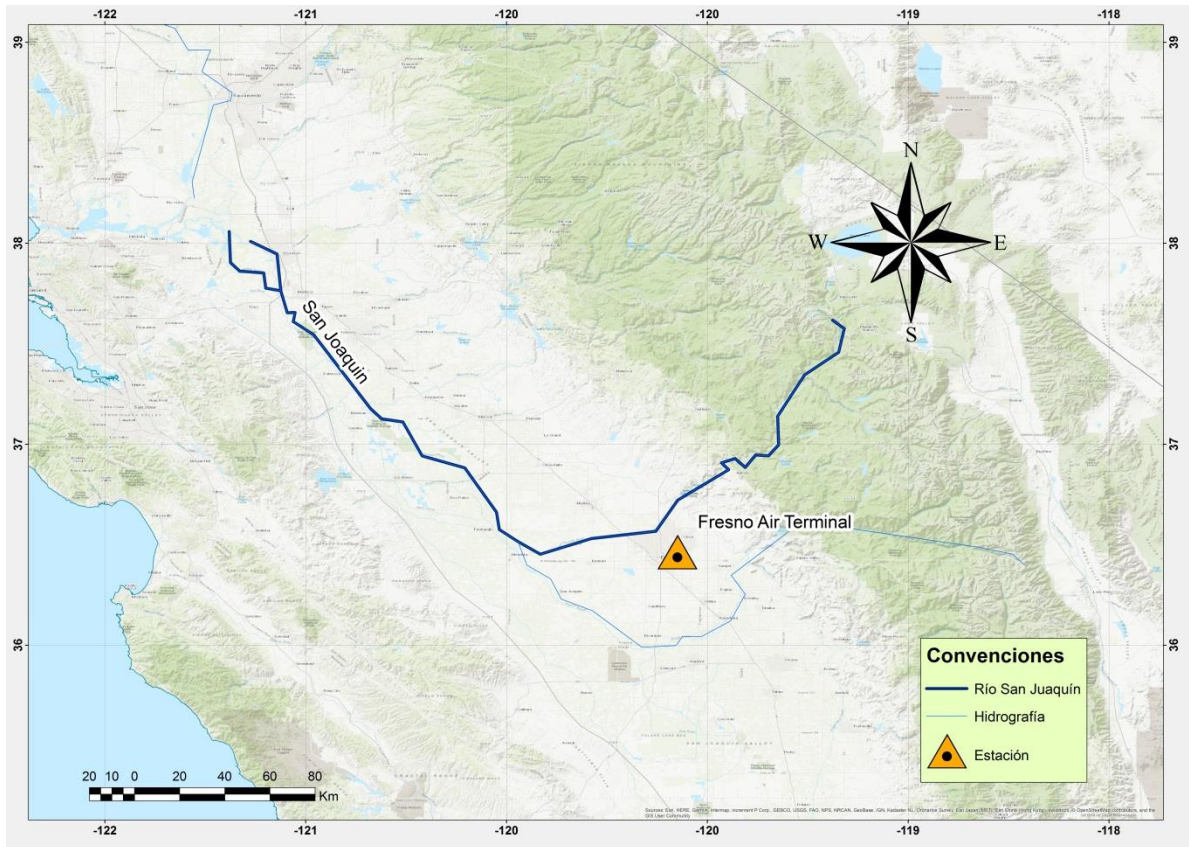
Dado que BASE requiere una serie de tiempo de radiación fotosintética activa (*photosynthetic active radiation*, PAR), el código convierte los datos de radiación solar a PAR usando el factor de conversión expresado en la Ecuación 7 (Meek, Hatfield, Howell, Idso, & Reginato, 1984).

$$PAR (\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) = 2.04 \pm 0.06 \cdot \text{SolRad} (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Ecuación 7}$$

El código termina generando una tabla final que informa los valores diarios de radiación solar (máximo y promedio en  $\text{W m}^{-2}$ ), y los valores: máximo, medio y mínimo de PAR en unidades de ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y ( $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Adicionalmente, a partir de la serie de tiempo horaria de PAR se genera, vía interpolación lineal usando el software Matlab, una nueva serie de tiempo de PAR pero para intervalos de 15 minutos.

### 5.3.2 Presión atmosférica

MesoWest, es el sitio web proporciona el acceso a las observaciones meteorológicas actuales y las de tiempos anteriores en todo Estados Unidos. Estas observaciones meteorológicas incluyen la presión atmosférica. Para este estudio la estación de interés es KFAT o Fresno Air Terminal (Mapa 3) teniendo en cuenta que es la estación que se encuentra cerca de la zona de estudio en las coordenadas  $36^{\circ}46'15''\text{N}$  y  $119^{\circ}43'08''\text{O}$ .



Mapa 3. Localización geográfica de la estación Fresno Air Terminal sitio web MesoWest.

La descripción general del procesamiento de los datos de presión atmosférica de la estación KFAT se muestra en la Figura 7. La presión atmosférica es un dato importante en el cálculo del MCA ya que, influye en la estimación de la concentración saturada de oxígeno en el agua. La plataforma permite descargar datos horarios de presión atmosférica hasta una serie de tiempo de año, generando un archivo .CSV. Al tener completos cada paquete (por años) de datos de presión atmosférica, es necesario realizar una recopilación de datos en un solo documento, de tal forma que la información sea más fácil de procesar y de filtrar datos (columnas) que no son relevantes para este estudio (solo interesan los datos de presión atmosférica y los intervalos de tiempo correspondientes a estos valores).



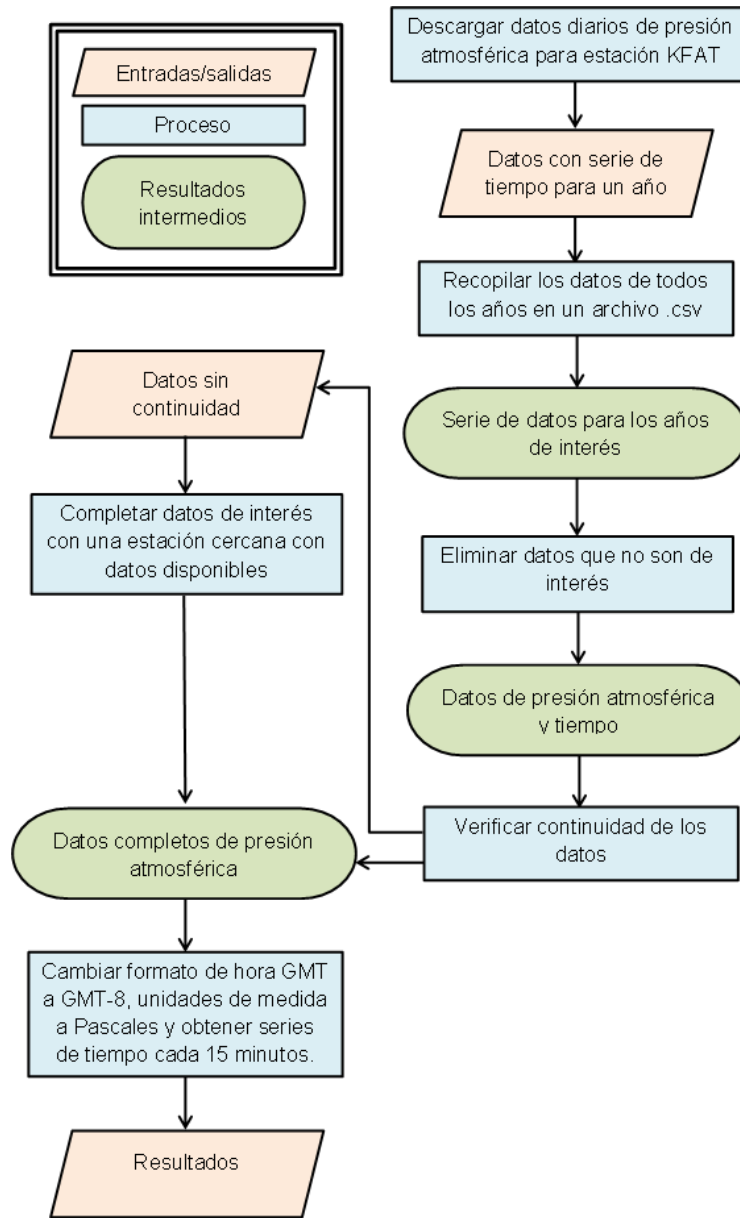


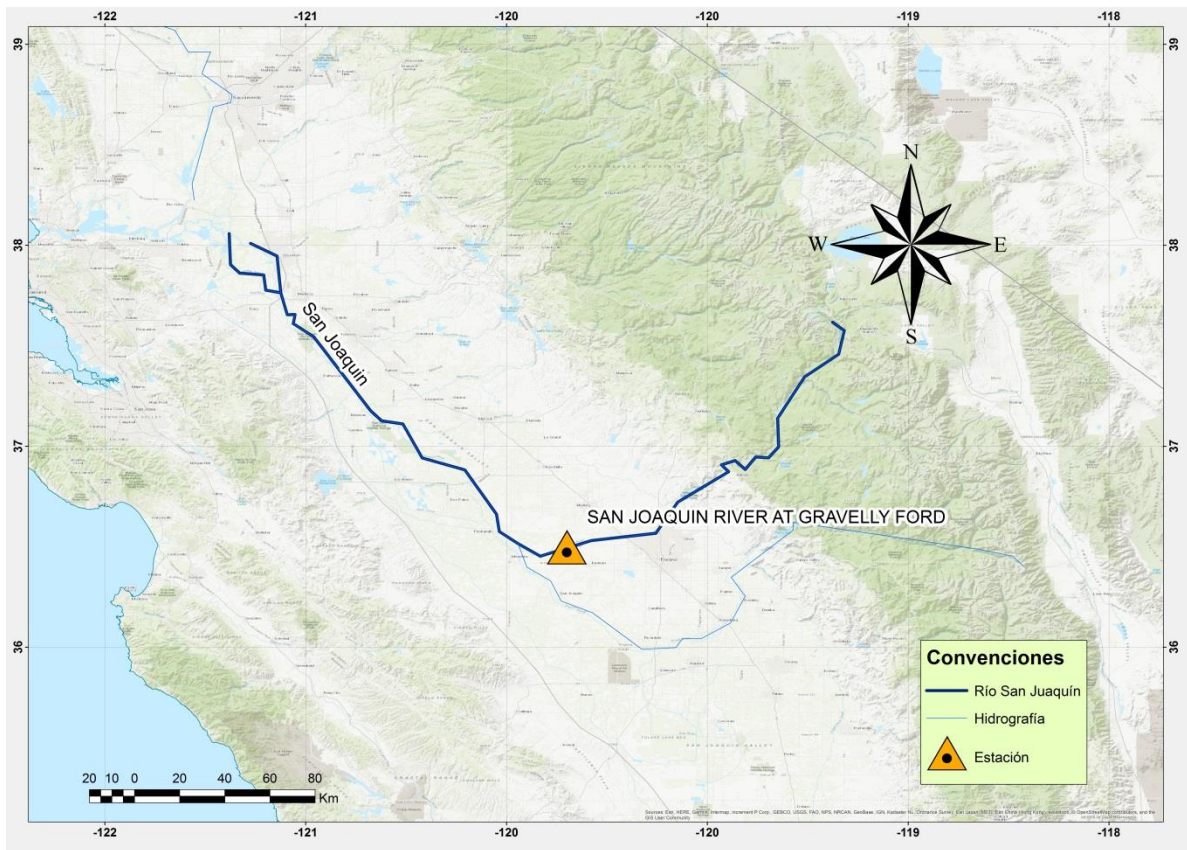
Figura 7. Metodología general para obtener datos de presión atmosférica

Igual que para el caso de la estación 105 de CIMIS, es necesario completar datos faltantes a partir de interpolación lineal usando información de estaciones cercanas. Una vez completos los datos, se obtiene un archivo de datos horarios de presión atmosférica a nivel del mar en unidades de atmósferas (atm), de tal forma que deben convertirse a Pascales (Pa) mediante el uso de Excel con su respectivo factor de conversión, y con un formato de hora en GMT (tiempo para el meridiano de Greenwich), lo que hace necesario generar una nueva serie de presión atmosférica que sea reportada cada 15 minutos usando interpolación lineal y formateada para

obtenerla en zona horaria GMT-8 (correspondiente a la zona horaria de California, sin considerar el horario de verano), mediante el uso del software Matlab.

### 5.3.3 Caudal, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica

El Centro de intercambio de datos de California (*California Data Exchange Center, CDEC*) administra un servidor que ofrece series históricas de datos hidrológicos para estaciones administradas por diferentes entidades nacionales y estatales. Para el caso del tramo de restauración del río San Joaquín, la estación Gravelly Ford (GRF) ofrece series históricas (cada 15 minutos) de caudal, temperatura del agua, OD, conductividad eléctrica y otros parámetros. La estación se encuentra localizada en la parte alta del tramo de restauración en las coordenadas 36°47'53"N y 120°09'36"O (Mapa 4).



Mapa 4. Localización geográfica de la estación GRF.

Los datos recolectados se obtienen a partir de un algoritmo desarrollado con el software R donde en las secciones 1 a 3 del código se configuran el directorio de trabajo, se instalan los paquetes

necesarios (chron, zoo, maptools, stringr, tcltk) y se ejecutan funciones adicionales que soportan el procesamiento de los datos dentro del código (check.normality.r, daily.param1.r, data.down.r, doxy.cs.r, filter2.outlier.r, metabolism.empirical.uncertainty.r, plot.filter1.r, reaeration.empirical.r). En la sección 4, el código lee las entradas de los datos meteorológicos y los rangos ambientales. Estos archivos contienen datos para todo el período de análisis (2010-2018). El archivo de rangos ambientales ('env.ranges') consiste en una serie de tiempo mensual de valores máximos y mínimos para cada uno de los principales parámetros del agua (flujo o caudal, temp, doxy y spcon) durante el período de estudio. Estos valores se obtienen a través de una inspección visual de los datos sin procesar utilizando la interfaz web de CDEC y apuntan a filtrar los valores atípicos más claros durante el proceso de descarga de datos (sección 8 del código). La Sección 6 define la estructura de la tabla de resultados y crea el archivo de resultados dentro del directorio de trabajo. Las secciones 1 a 6 se ejecutan solo una vez al comienzo del proceso.

Para cada iteración (que abarca un período de un mes), se ejecuta las secciones 6 a 15 de la secuencia de comandos. La Sección 7 limpia el espacio de trabajo eliminando todos los objetos que no son necesarios para la próxima iteración mensual (este paso es significativo al estimar el metabolismo para varios meses). El script dejará de ejecutarse cuando no encuentre al menos un punto de datos durante un día determinado (no hay datos disponibles en CDEC). Para evitar esto, se debe utilizar el conocimiento previo de los datos para excluir esas fechas. Finalmente, dentro de esta sección, el código extrae los valores máximos y mínimos correspondientes para cada parámetro de agua de la variable 'env.ranges'.

Dentro del código en las secciones 11 a 15 se encuentra un ciclo "for", el cual se ejecuta para cada día especificado. La función "data.down" descarga los datos de agua directamente desde el repositorio de datos de CDEC utilizando la zona horaria "Hora estándar del Pacífico". El resultado de esta función es una serie de tiempo de cada parámetro de agua en unidades estandarizadas (flujo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), doxy ( $\text{mg l}^{-1}$ ) y spcon ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )). Para proporcionar información sobre la calidad de los datos descargados durante dos días consecutivos, la sección 12 crea e imprime un gráfico agrupando las cuatro variables. En la sección 13, la función 'filter2.outlier' filtra la mayoría de los valores atípicos locales utilizando un análisis de histograma de las pendientes entre puntos de datos consecutivos. Finalmente, en la sección 15 se usa la función 'daily.param1' para comenzar a consolidar la tabla de resultados ('diel.parameters') usando los datos disponibles sobre el agua y el clima.

La secuencia general del procedimiento mencionado anteriormente se relaciona en (Figura 8).

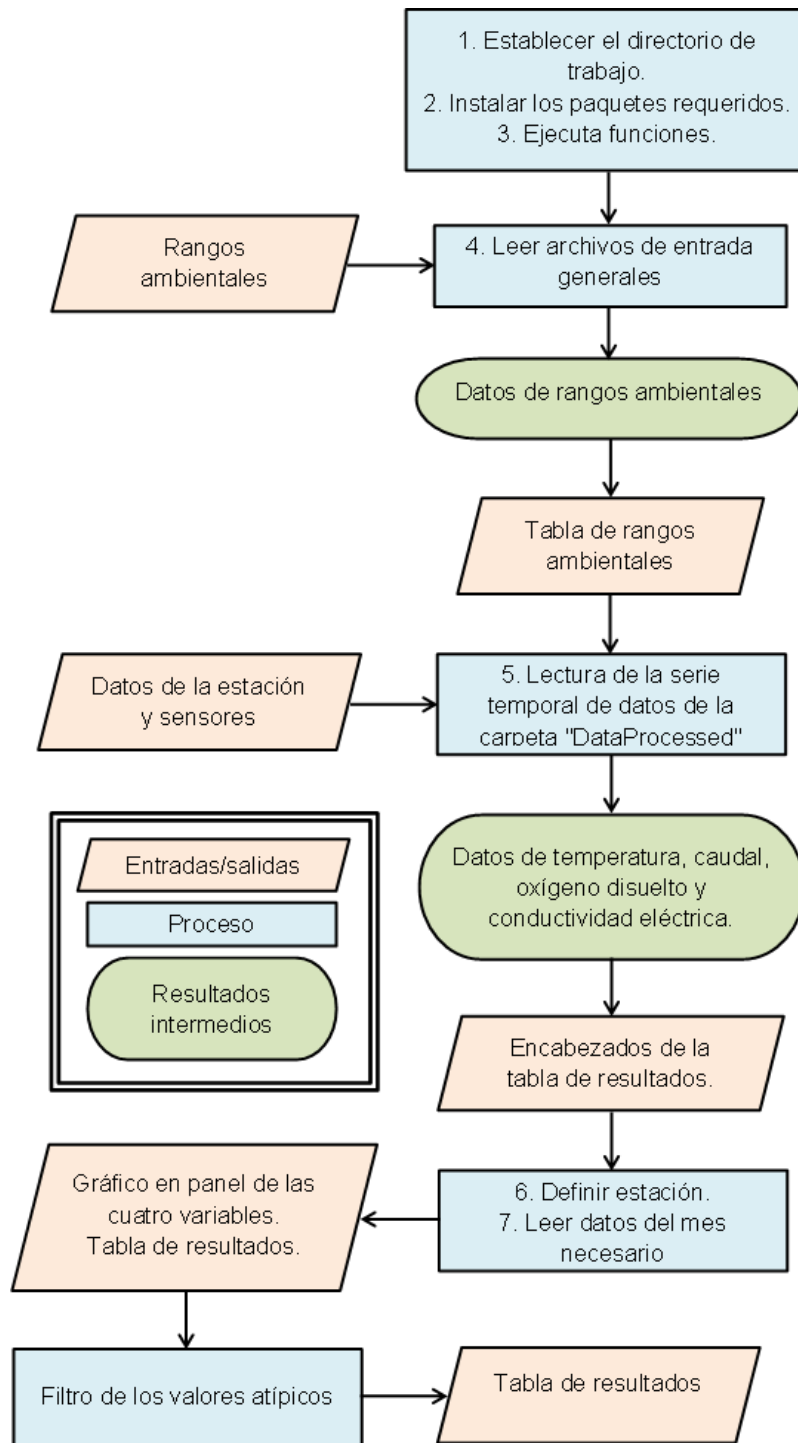


Figura 8. Metodología general para obtener datos de caudal, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (flujo, temp, doxy, spcon)

#### 5.4 Descripción del modelo “BASE”

El modelo BASE descrito por Grace et al., (2015) y Kéry (2010) utiliza la estimación bayesiana para resolver la Ecuación 6 teniendo en cuenta 2000 iteraciones (número elevado con el fin de simular la cadena y aproximarse a la distribución estacionaria) y datos para un día cada 15 minutos, con una operación por lotes de modo que permite analizar los datos de un mes en aproximadamente 75 minutos (para un conjunto de datos con un intervalo de muestreo de 900 s) por medio de un computador estándar. BASE estima las tasas de MCA para una estación, donde el modelo es llamado desde un código desarrollado en R (Call\_BASE\_v2.3) (Grace et al., 2015). Las entradas del modelo se proporcionan en un archivo de valores separados por comas (.CSV) con una estructura especificada por los desarrolladores. La estructura general de trabajo de BASE se muestra en la (Figura 9).

El código en R (Call\_BASE\_v2.3) invoca un paquete de software para inferencia bayesiana (OpenBUGS) para ejecutar las iteraciones de Markov Chain Monte Carlo (MCMC). El modelo puede ejecutar cualquier número de días consecutivos requeridos por el usuario cuando las entradas se organizan en archivos CSV separados en una carpeta. Un programa adicional, desarrollado en R (BASE\_metab\_model\_v2.3), produce un archivo único que contiene muchos días (BASE\_results.csv) de datos del registrador en archivos individuales para cada día, adecuados para su uso directo por BASE. El programa se ejecuta con 3 parámetros estimables ( $A$ ,  $R$  y  $K_{O_2}$ , ver Ecuación 6) (Grace et al., 2015) y con los datos de entrada (fecha, hora, PAR, temperatura, oxígeno disuelto, presión atmosférica y salinidad), los cuales han sido preparados para su uso con antelación. Los parámetros estimables son necesarios para ejecutar correctamente el script 1, el cual en conjunto con los datos de entrada, proporcionan tres salidas que conforman los estimativos de MCA y datos estadísticos.

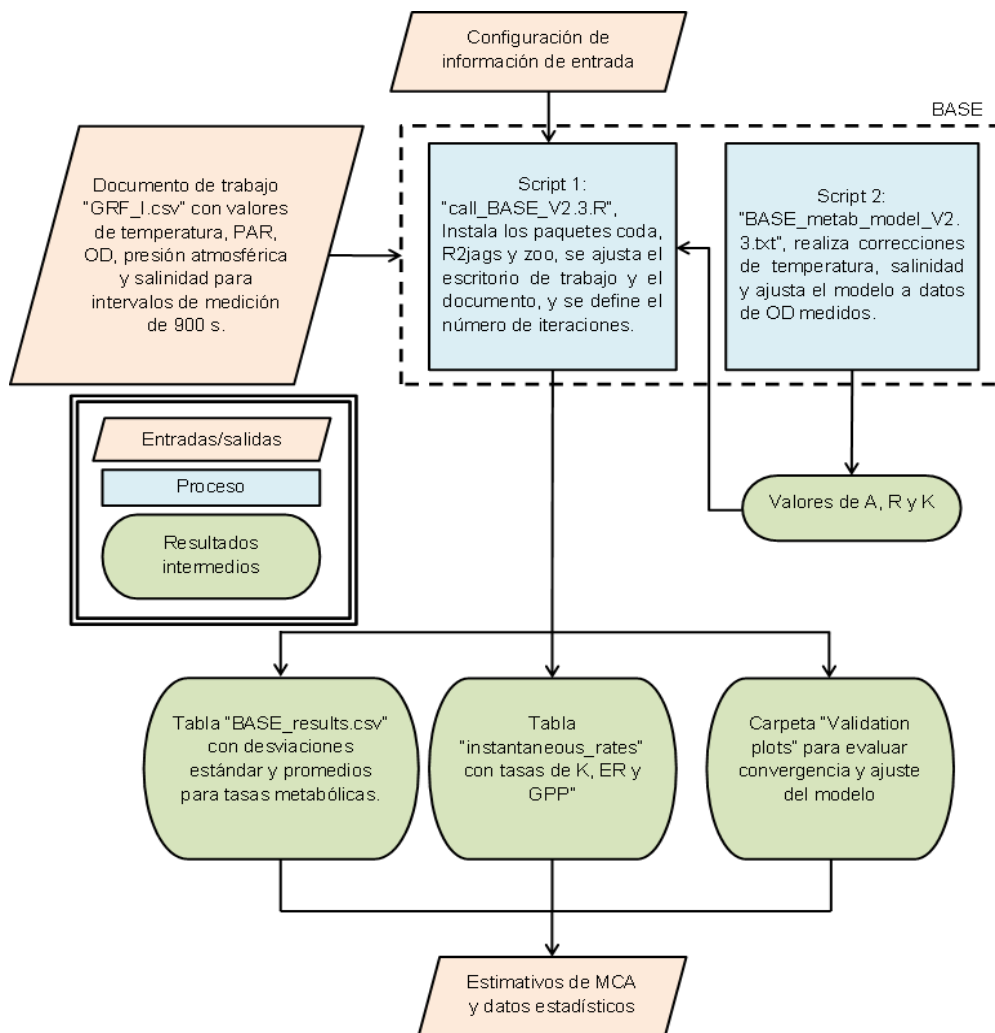


Figura 9. Metodología general para obtener datos MCA

## 5.5 Estrategias para el análisis de los resultados obtenidos

### 5.5.1 Verificación de datos estadísticos

Para determinar la usabilidad de los resultados diarios de MCA (GPP y ER) en la interpretación del efecto de la regulación de caudal en el tramo restaurado del río San Joaquín, es necesario verificar los estadísticos provistos por la herramienta BASE (ver Tabla 1):

**Tabla 1. Descripción de estadísticos provistos por BASE.**

VARIABLE	DEFINICIÓN	VALORES ACEPTABLES
R <sup>2</sup>	Correlación entre los datos de oxígeno medidos y estimados.	La correlación (R <sup>2</sup> ) entre los datos de OD observados y modelados se informa en la tabla de resultados. Debido a la naturaleza temporal y correlacionada de las series temporales de OD, el R <sup>2</sup> puede ser alto cuando las estimaciones del modelo están constantemente por encima o por debajo de los valores medidos.  En estos casos, el ajuste deficiente puede estar indicado por el error cuadrado medio residual (rmse) y la fracción de longitud de ejecución máxima (mrl.fraction). El R <sup>2</sup> siempre se encuentra entre 0 y 1.
rmse.relative	Error medio cuadrático residual relativo - Medida numérica de ajuste del modelo.	El rmse es específico para la magnitud de los datos estudiados y se debe comparar solo con resultados del mismo sitio de evaluación. El rmse relativo se expresa en relación con la variación de punto a punto de los datos.
mrl.fraction	Fracción máxima de corrida - Medida numérica de ajuste del modelo.	Proporción de tiempo ocupada por la corrida más larga de valores para los que el valor estimado de OD está por encima o por debajo del valor medido de OD.
PPP ( <i>posterior predictive p-value</i> )	Compara la falta de ajuste del modelo con los datos reales contra la falta de ajuste a una distribución de posibles discrepancias del modelo mediante el uso de datos simulados - Medida numérica de ajuste del modelo.	Un valor de PPP de cerca de 0.5 indica un modelo muy recomendable, mientras que los valores PPP<0.1 o PPP> 0.9 indican que el modelo parametrizado no es una explicación recomendable de los datos observados.
R-hat	Valores de R-hat para todos los parámetros (métrica de convergencia)	Valores cercanos a 1 indican una buena convergencia, mientras que los valores mayores a 1.1 indican lo contrario. Los valores se pueden mejorar (no siempre) aumentando el número de iteraciones.
Convergence.check	Verificación de convergencia	"convergence.check", comprueba si todos los valores de R-hat son <1.1 y se pueden usar para evaluar rápidamente la convergencia (devuelve "fine" cuando todos los R-hats <1.1).

VARIABLE	DEFINICIÓN	VALORES ACEPTABLES
		La convergencia también puede evaluarse visualmente examinando que las distribuciones son estacionarias y que las cadenas están bien mezcladas en los gráficos de traza de MCMC para cada uno de los parámetros A, p, R, K y Teta (solo A, R y K para nuestro caso). Las tres cadenas deben ser convergentes (superpuestas) y estacionarias (centradas). Cuando se usan valores fijos de p y teta, los gráficos de traza muestran líneas horizontales sin variación. *El ajuste del modelo se puede ver también en el gráfico de DO medido (círculos) y predicho (línea negra).
pD	Número efectivo de parámetros.	Este valor normalmente debería ser positivo. El pD negativo puede indicar que la media posterior no es una buena medida de la distribución posterior y es probable que haya un problema con el modelo.

De acuerdo con las recomendaciones de Grace et al. (2015) el procedimiento sugerido para la verificación de los estadísticos es:

- Revisar convergencia ( $R-hats < 1.1$ ; convergence.check = 'fine'),
- Revisar el ajuste de PPP (entre 0.1 y 0.9, con valores cercanos a 0.5 sugiriendo un modelo muy recomendable),
- Comprobar que pD es positivo ( $pD > 0$ ),
- Analizar la tendencia gráfica de los resultados del modelo,
- Evaluar la correlación del modelo mediante el indicador estadístico  $R^2$ .

### 5.5.2 Análisis del caudal vs otros parámetros.

Se identificaron períodos en los que el caudal del río fue nulo o casi nulo, y estos períodos se trataron con alguna discreción dado que es posible que los datos de calidad de agua no estén reflejando los valores promedios del tramo en evaluación sino condiciones particulares (posible estancamiento de agua) en el punto de localización de la sonda multiparámetro. Para el resto del período de análisis, se identificaron los diferentes tipos de pulsos o comportamientos del caudal y finalmente, se buscó identificar asociaciones entre los estimativos diarios de MCA y el parámetro



principal de análisis en este estudio (caudal promedio diario), así como con parámetros auxiliares (PAR, temperatura del agua, rangos de oxígeno disuelto, Clorofila, turbidez, etc.).

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El trabajo en general, incluyendo sus diferentes componentes, conduce a la producción de estimaciones diarias continuas de MCA, así como información auxiliar que es utilizada para la interpretación de los resultados. Primero, se presenta una descripción de la tendencia del caudal y los datos auxiliares observados en el periodo de interés (2010-2018) y luego se presentan las series temporales de las tasas metabólicas (GPP y ER). La interpretación y discusión de los resultados se basa en la respuesta del río a las perturbaciones del flujo (pulsos de agua). La tendencia del flujo del Río San Joaquín para el periodo 2010-2018 muestra condiciones fuertemente variables que dificultan la generalización de los resultados pero que a la vez permiten analizar varios tipos de casos. Dado que algunos valores de OD no estuvieron disponibles en el sitio web CDEC, para esos períodos no fue posible determinar el MCA. La no disponibilidad de los datos de OD puede atribuirse a daños en el sensor, descalibración, o ubicación del sensor por fuera del agua debido a caudales muy bajos.

### 6.1 Tipos de pulsos o entregas de caudal en el período 2010-2018.

La dinámica de flujo del tramo de restauración del río San Joaquín para el período 2010-2018 tuvo condiciones altamente variables (Figura 10). De manera global, el rango de caudales obtuvo valores mínimos cercanos a  $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (correspondientes a épocas secas), y valores máximos de hasta  $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , correspondientes a épocas húmedas asociadas con el fenómeno de La Niña (enero-julio 2011 y enero-junio 2017).

Aunque los pulsos de restauración se definieron inicialmente como dos pulsos al año, uno en la primavera y otro en el otoño, estos no se cumplieron consistentemente durante el período de evaluación, dadas las condiciones de clima de la zona y las necesidades de los agricultores; en algunos casos se presentó un solo pulso por año, en épocas de verano (períodos de irrigación intensiva), con valores entre 0 y  $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 10).

Los pulsos de transferencia de agua que se presentaron en todo el periodo de estudio (2010-2018), de acuerdo con su magnitud, tuvieron efectos en la tendencia general de los rangos diarios de oxígeno disuelto (diferencias entre valores máximos y mínimos) y en la temperatura del agua (Figura 10). El efecto general fue de reducción y uniformización de los rangos diarios de OD y reducción de la temperatura.

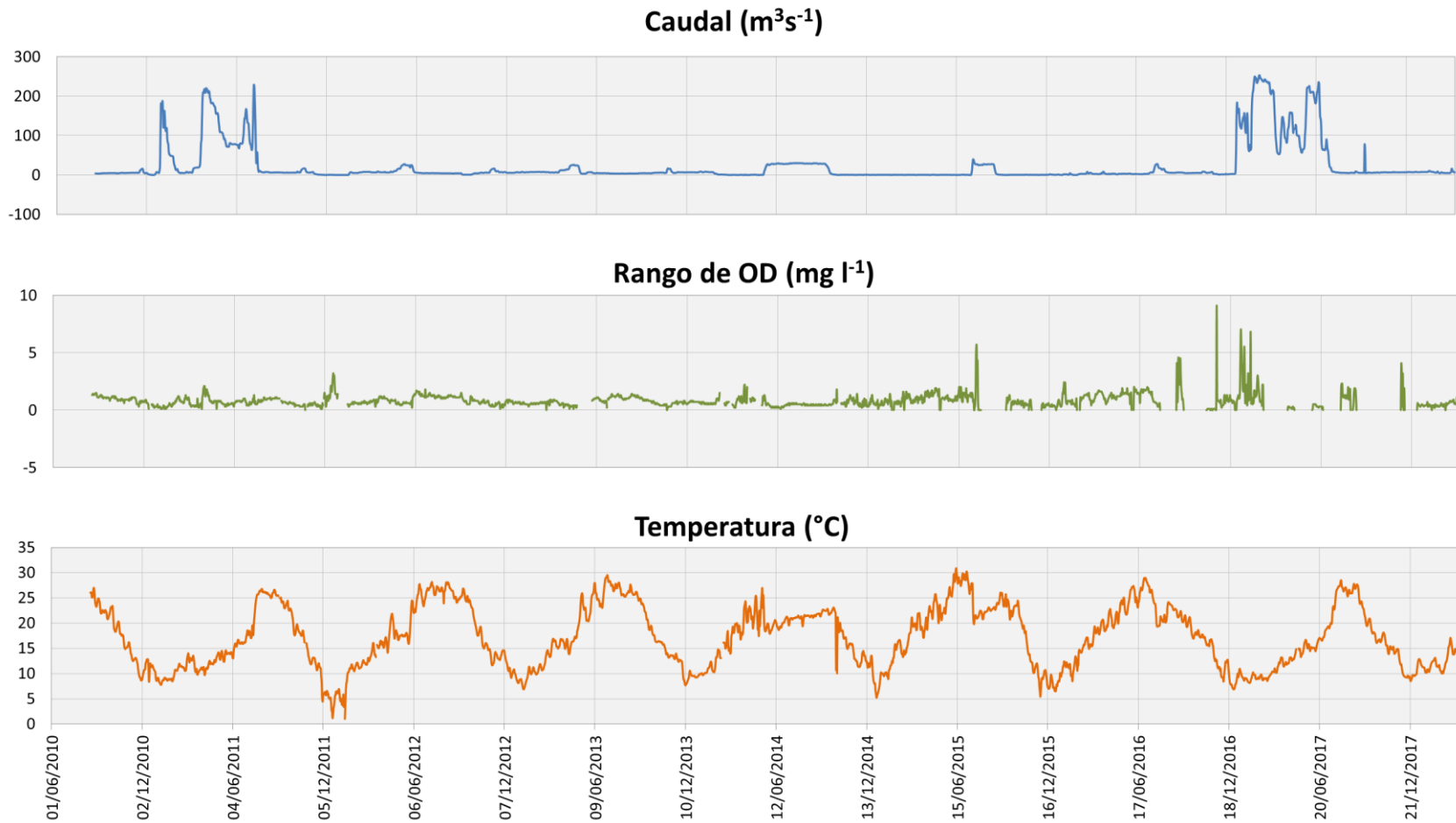


Figura 10. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el período 2010-2018  
 \*Los datos incompletos en el panel central ("Rango de OD") corresponden a períodos sin datos disponibles de OD en CDEC.

En las siguientes secciones se describen tres de los periodos más representativos por su variación en el caudal.

### 6.1.1 Pulsos o entregas de caudal en el año 2011

El periodo del año 2011 tuvo grandes caudales asociados al fenómeno de La Niña (NOAA's, 2004). El gran pulso inició en diciembre de 2010 y se extendió, de manera variable, hasta julio de 2011. Una vez finalizado este pulso, el caudal del tramo fue mínimo (valores cercanos a  $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), a excepción el pulso de otoño del 2011, cuya magnitud alcanzó valores cercanos a  $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 11).

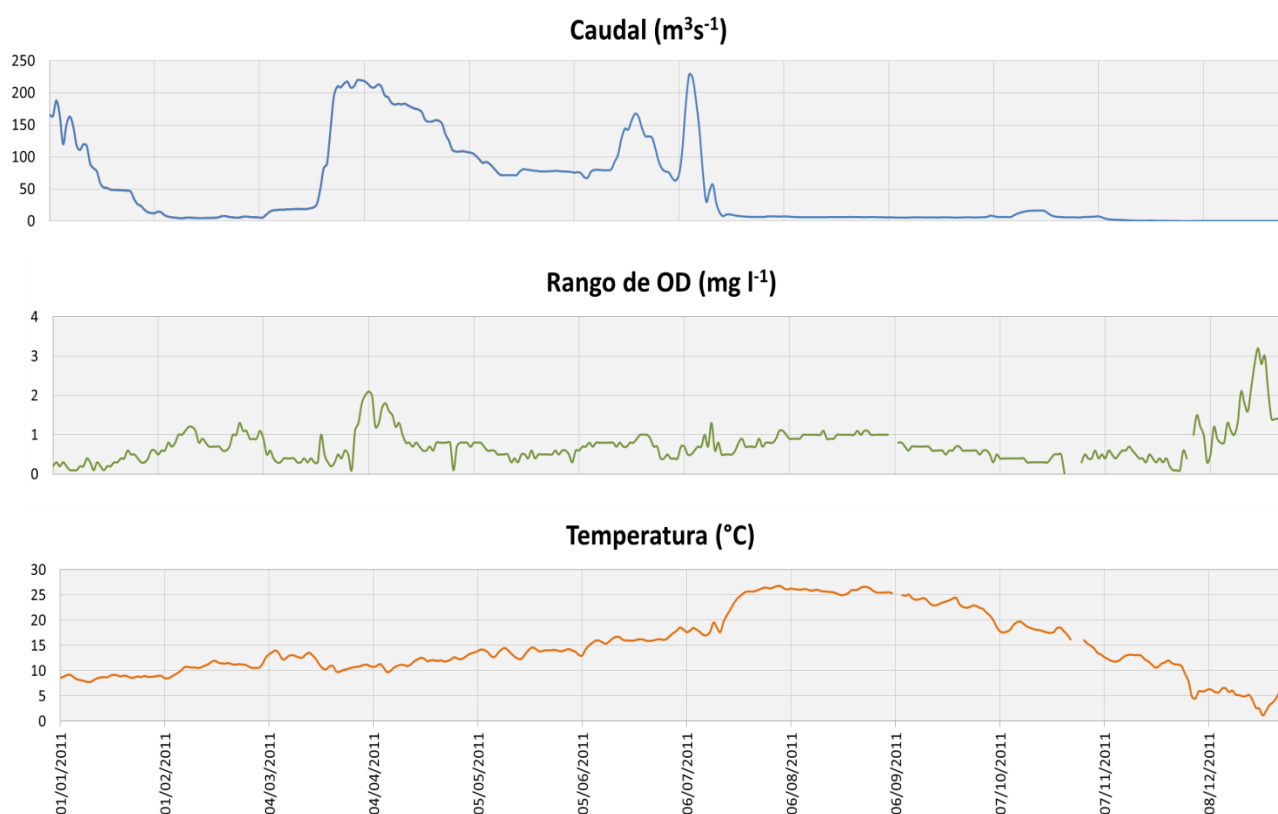


Figura 11. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el año 2011.

Debido a las variaciones en la cantidad de agua en el tramo, el rango de OD mantuvo una dinámica variable. El gran pulso del 2011, en general, atenuó la tendencia de los rangos de OD el tramo, presentando valores de hasta aproximadamente  $1.2 \text{ mg l}^{-1}$  en el período enero-julio, exceptuando un pico mayor que ocurrió en abril que alcanzó valores de hasta  $2 \text{ mg l}^{-1}$ . Este pico se asocia a una recarga de nutrientes transportada desde aguas arriba por el pulso reiniciado a

finales del mes de marzo, junto con el incremento de las tasas respiratorias del ecosistema. El periodo agosto-noviembre muestra una tendencia a la atenuación de los rangos de OD relacionados con la finalización del período productivo del tramo (inicio de la época de invierno). El pulso del mes de octubre uniformiza los valores de rango de OD. Finalmente, durante los meses de noviembre y diciembre, los grandes rangos de OD, valores cercanos a  $3 \text{ mg l}^{-1}$ , (no esperados para esta época del año), pueden asociarse con condiciones de eutrofización en el punto de monitoreo dados los muy bajos caudales presentados durante dicho periodo (**Figura 11**).

La temperatura del agua sufrió una atenuación importante de su tendencia anual debido al gran pulso del 2011 (Figura 11). Una vez finalizado el pulso, el tramo recobró las condiciones típicas de temperatura de la época, aumentando en aproximadamente 8 grados, y continuó con la tendencia de reducción de la temperatura a medida que se alcanzaron las época más frías de otoño e invierno.

### **6.1.2 Pulsos o entregas de caudal en el período 2012-2013**

En el periodo 2012-2013 se presentaron pulsos típicos de la restauración (pulsos de primavera y otoño). La diferencia entre la magnitud de pulsos grandes a pequeños se asocia con la disponibilidad de agua. Los pulsos más grandes de primavera de 2012 y 2013 (entre abril y mayo), tuvieron valores de  $25$  a  $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; los pulsos más pequeños de otoño para 2012 y 2013 (entre octubre y noviembre), presentaron caudales de  $15$  a  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En otras fechas no relacionadas con los pulsos, se mantuvo un caudal de aproximadamente  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Estos pulsos se asocian resultaron en la reducción de los rangos diarios de OD con respecto a la tendencia general anual (rangos pequeños en las épocas frías y poco productivas, y rangos grandes en las épocas más cálidas y más productivas). Los cuatro pulsos disminuyeron los rangos de OD a valores aproximados a  $0.5 \text{ mg l}^{-1}$ , y la reducción del caudal después de los pulsos resultó en incrementos en los rangos de OD (valores cercanos a  $1.5 \text{ mg l}^{-1}$ ).

Los valores de temperatura del agua en todo el periodo (2012-2013) siguieron las tendencias típicas de acuerdo a la época del año (bajas temperaturas en el invierno e incremento hacia máximas temperaturas en el verano). El impacto de los pulsos de restauración en la temperatura del agua fue incipiente, reduciendo solo un poco las temperaturas del agua, con una afectación más clara para el caso de los pulsos de la primavera (Figura 12).

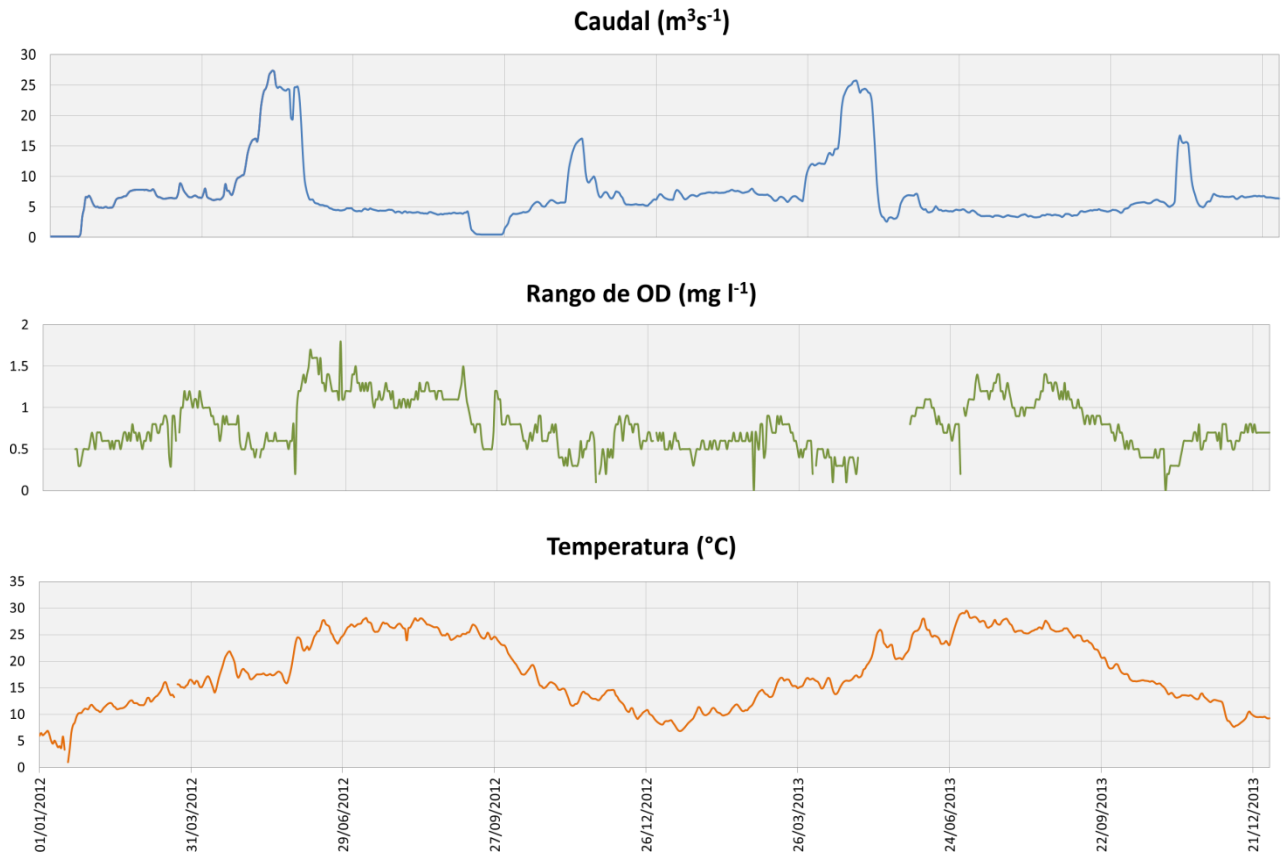


Figura 12. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el período 2012-2013

### 6.1.3 Pulsos o entregas de caudal en el período 2014-2015

Durante el verano y principios de otoño de los años 2014 y 2015, se presentaron dos descargas de aproximadamente  $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  con una duración mayor a los pulsos de los años anteriores (relacionados específicamente con los esfuerzos de restauración del río). El aumento en el caudal (en cantidad y duración) para fines de transferencia de agua con propósitos de riego, resultó en una atenuación significativa en la temperatura del agua dentro del tramo del río (valores entre 20 y 25 °C) y una disminución y uniformización de los valores del rango diario de OD (aproximadamente  $0.5 \text{ mg l}^{-1}$ ), para el caso del pulso del 2014 (no hay información de OD para el pulso del 2015) (ver Figura 13). Los muy bajos caudales presentados en el resto del período resultaron en el incremento de los rangos de OD independientemente de la época del año en que ocurrieron.

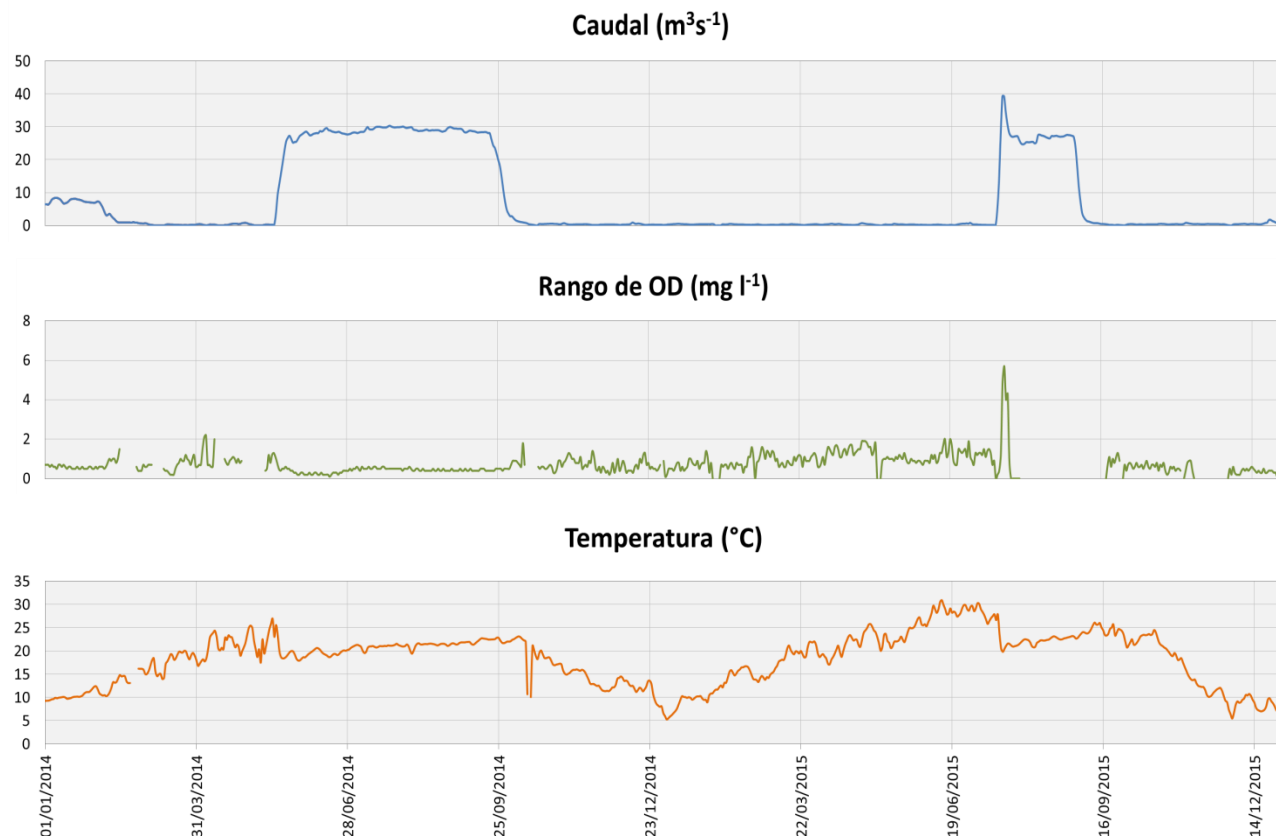


Figura 13. Serie de tiempo de caudal en la estación GRF para el período 2014-2015

## 6.2 Evaluación del ajuste de los resultados de MCA

La serie de tiempo utilizada para este estudio comprendió el período entre el 19 de Agosto de 2010 y el 31 de Marzo de 2018 (2781 días), período para el cual se encontraron disponibles los datos requeridos para la estimación de MCA para el tramo de restauración del río San Joaquín. Sin embargo, se debe tener en cuenta que no todos los días del período tuvieron series completas de OD que permitieran realizar el análisis de MCA con la herramienta BASE (546 días no fueron procesados). Para los días en que se pudo estimar el MCA (2235 días), se realizó la verificación recomendada por Grace et al. (2015) de tal manera que solo se utilizaron los datos que pasaron dicho filtro (2103 días). La Tabla 2 muestra el número de días que incumplieron cada uno de los criterios de evaluación recomendados.

Tabla 2. Número de días que fallan la verificación de estadísticos.

PARÁMETRO	DÍAS QUE FALLA LA VERIFICACIÓN
Convergencia	36 de 2235
PPP	48 de 2235
pD	0 de 2235
Confirmar visualmente que el modelo es apropiado.	77 de 2235

### 6.2.1 Evaluación de la convergencia de forma visual

La convergencia no solo se evalúa teniendo en cuenta el criterio “Convergence.check” como se describió en la sección 5.5.1, sino que también puede evaluarse visualmente teniendo en cuenta que las distribuciones de las cadenas MCMC (por defecto 3) cumplan con un comportamiento estacionario (que no haya variación significativa a lo largo de las iteraciones) y que estas estén bien mezcladas. BASE proporciona un archivo .jpg con múltiples paneles para cada día en la carpeta de resultados denominada “validation plots”. Estos paneles incluyen los gráficos de seguimiento para las cadenas MCMC de las tasas de  $A$ ,  $p$ ,  $R$ ,  $K$  y  $\theta$ . Las tres cadenas proporcionadas en cada gráfico deben ser convergentes (superpuestas) y estacionarias (centradas) (Figura 14), de lo contrario, es un indicador de no convergencia y, por lo tanto, no se obtienen buenos resultados para el ajuste (Figura 15). Teniendo en cuenta que los parámetros  $p$  y  $\theta$  se asumieron como valores constantes, en estas gráficas se muestran líneas horizontales sin variación para las cadenas.

Por otra parte, el ajuste del modelo también se puede verificar visualmente mediante el panel final donde se muestran la curva de OD medida (círculos vacíos) y pronosticada (línea negra continua) para cada día. Para determinar que un modelo tiene un buen ajuste, las curvas deben encontrarse superpuestas (Figura 14) de lo contrario el modelo tendrá un mal ajuste (Figura 15). Estas gráficas se usan con el fin de identificar las discrepancias entre los datos y el modelo. Las inconsistencias en los datos pueden indicar un incumplimiento en las suposiciones de OD del método, que especifica que sólo la reaireación, GPP y ER son los procesos que intervienen en el cambio diario de OD.



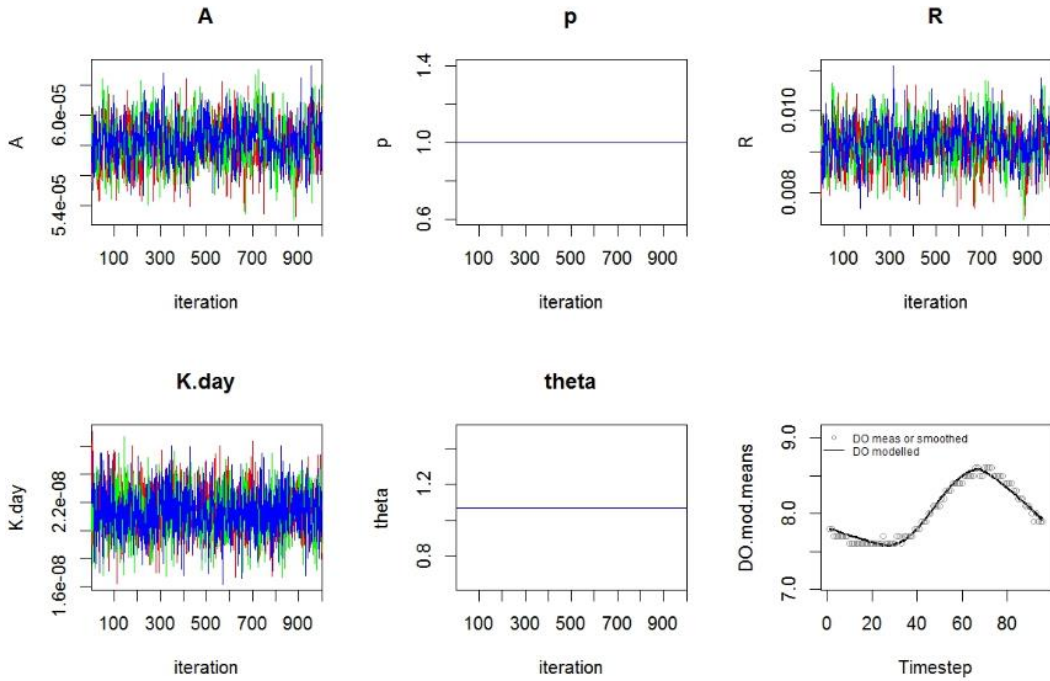


Figura 14. Ejemplo de gráficos convergentes y modelo de OD con buen ajuste

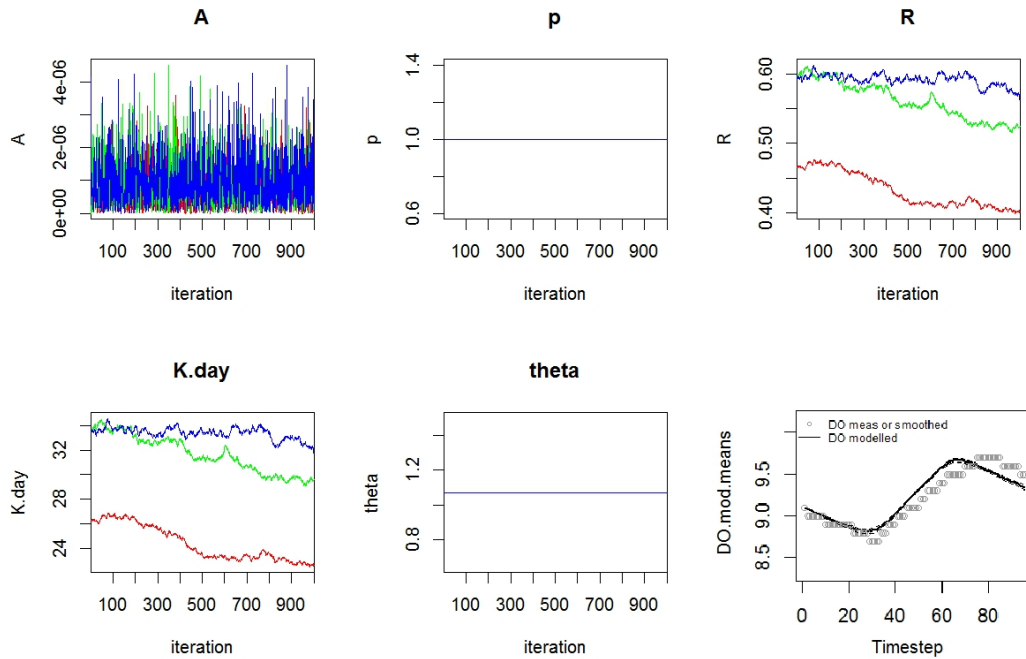


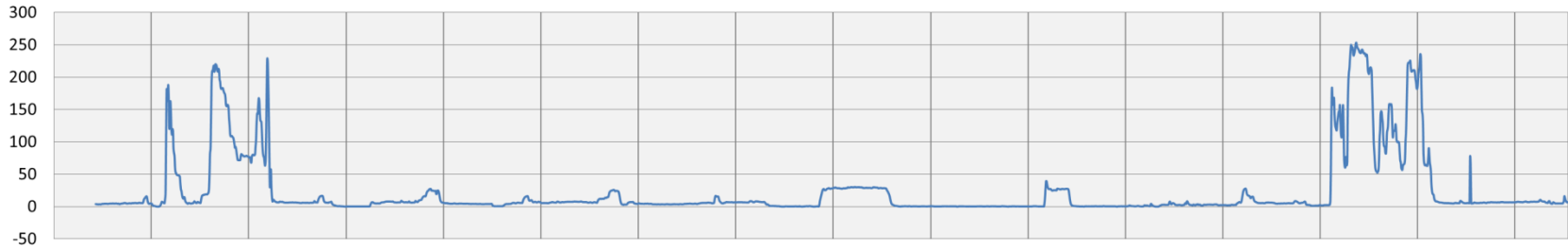
Figura 15. Ejemplo de gráficos no convergentes y modelo de OD con mal ajuste

### **6.3 Relación de los estimativos de metabolismo de cauce abierto (MCA) y el caudal.**

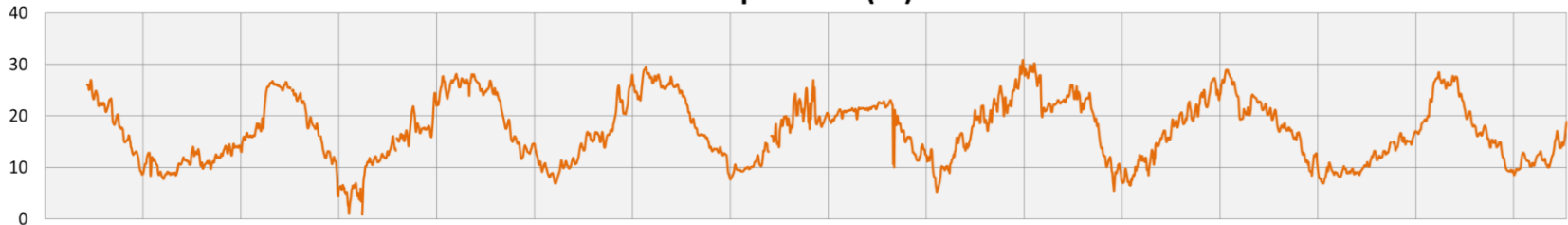
En términos de las tasas de MCA, las series de tiempo de GPP y ER mostraron un comportamiento variable en todo el periodo de estudio (ver Figura 16). ER presentó un rango amplio de valores (entre 0.0036 hasta 60mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), al igual que GPP (entre 0.0018 hasta 24mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>). Esta variabilidad estuvo asociada tanto a la época del año, como a los efectos de los diferentes pulsos o reducción de caudal. En general, existió una tendencia autótrofa (GPP>ER) reflejada en valores de NEM mayores a cero para el periodo 2010-2012, seguido de una transición a condiciones neutras a heterótrofas en el periodo 2013-2014, con un retorno a condiciones autótrofas para el periodo 2015-2017 (tratamos con reserva los resultados de los últimos meses del 2017 debido a la ausencia de datos de OD). Finalmente, debido a la falta de datos de OD a principios de 2018, no es posible definir una tendencia para este periodo, aunque mayormente se aprecian condiciones heterótrofas.

Las tasas metabólicas se vieron influenciadas por la época del año en todo el periodo de estudio de forma tal que, como es esperado, hubo más productividad en las épocas de verano cuando existió más disponibilidad de luz solar, y menos en la época de invierno. Adicionalmente, se aprecian grandes picos de GPP y ER distribuidos mayoritariamente en épocas de verano y condiciones de caudal mínimo que pueden estar asociados con episodios de eutrofización. Los pulsos de caudal importantes, por ejemplo, el del 2011 y el del 2014, resultaron en la reducción de picos de GPP y ER, generando un balance entre estos dos términos.

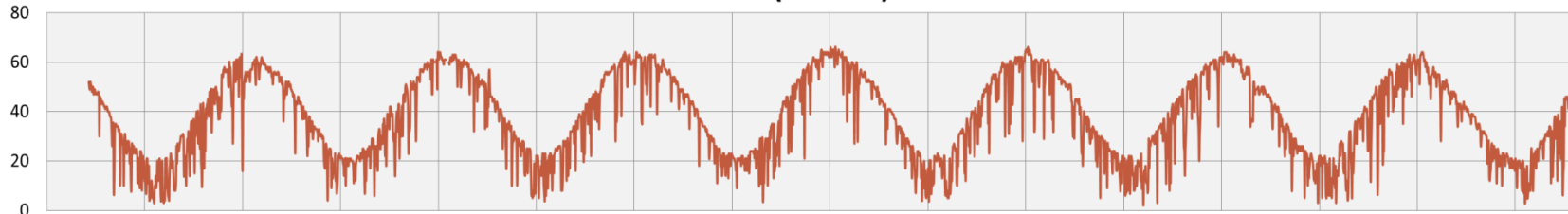
**Caudal ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )**



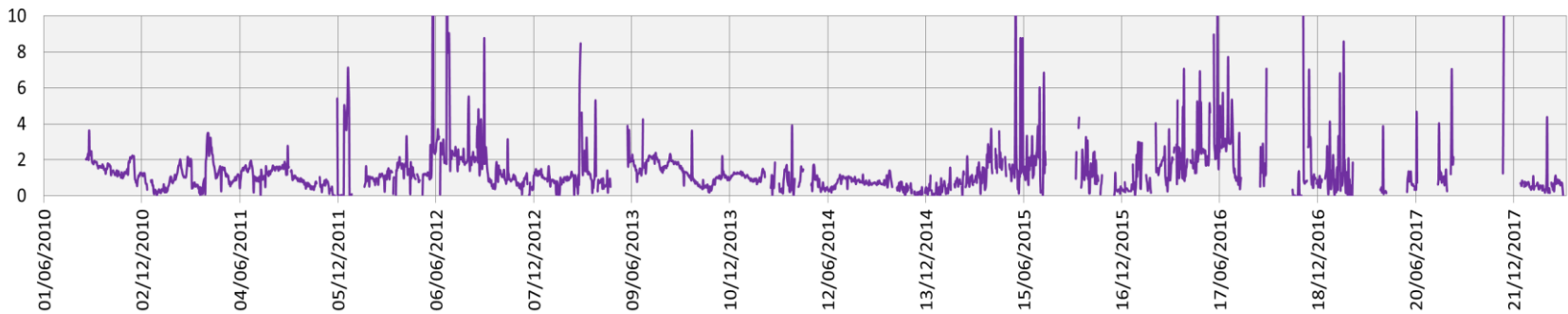
**Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )**



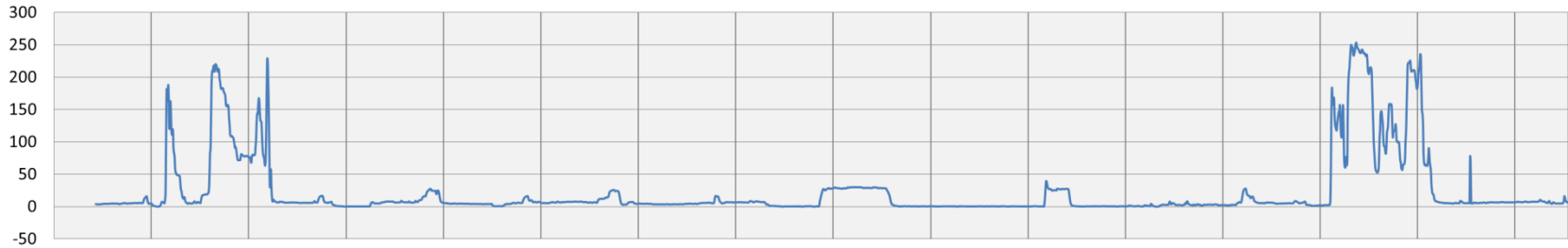
**PAR ( $\text{mol m}^{-2}$ )**



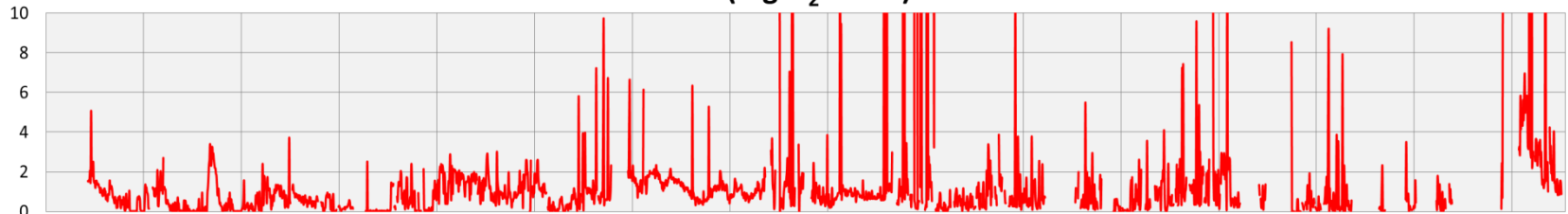
**GPP ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )**



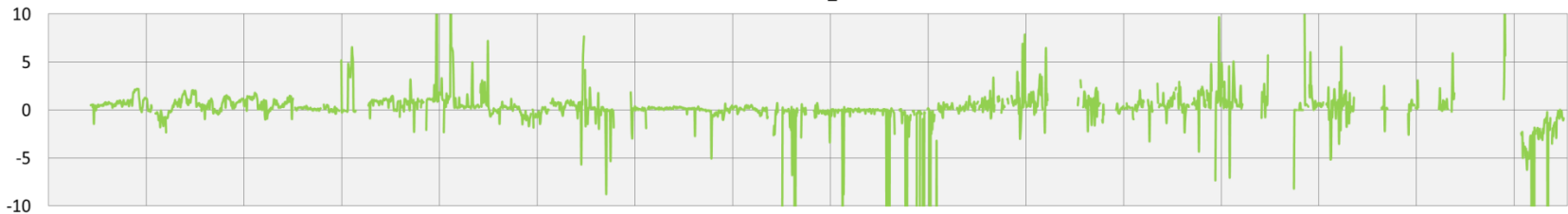
**Caudal ( $m^3s^{-1}$ )**



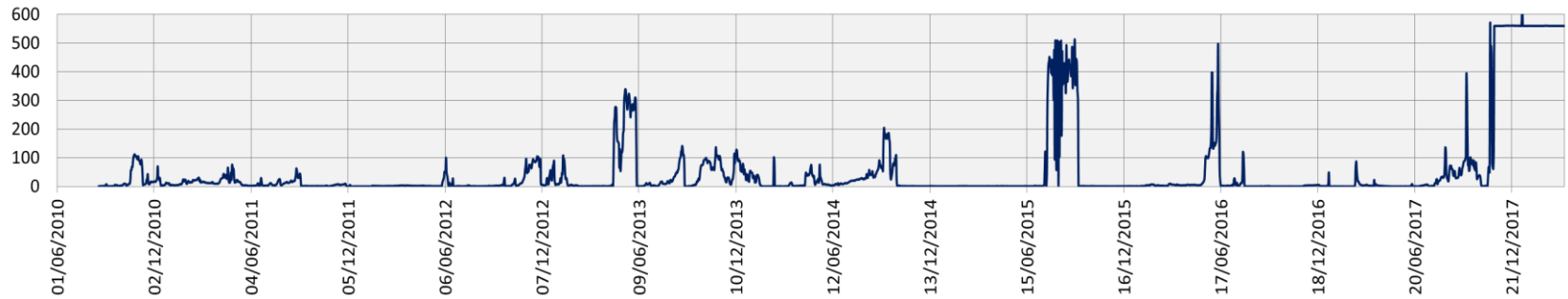
**ER ( $mg\ O_2\ L^{-1}\ d^{-1}$ )**



**NEM ( $mg\ O_2\ L^{-1}\ d^{-1}$ )**



**Clorofila ( $Ug\ l^{-1}$ )**



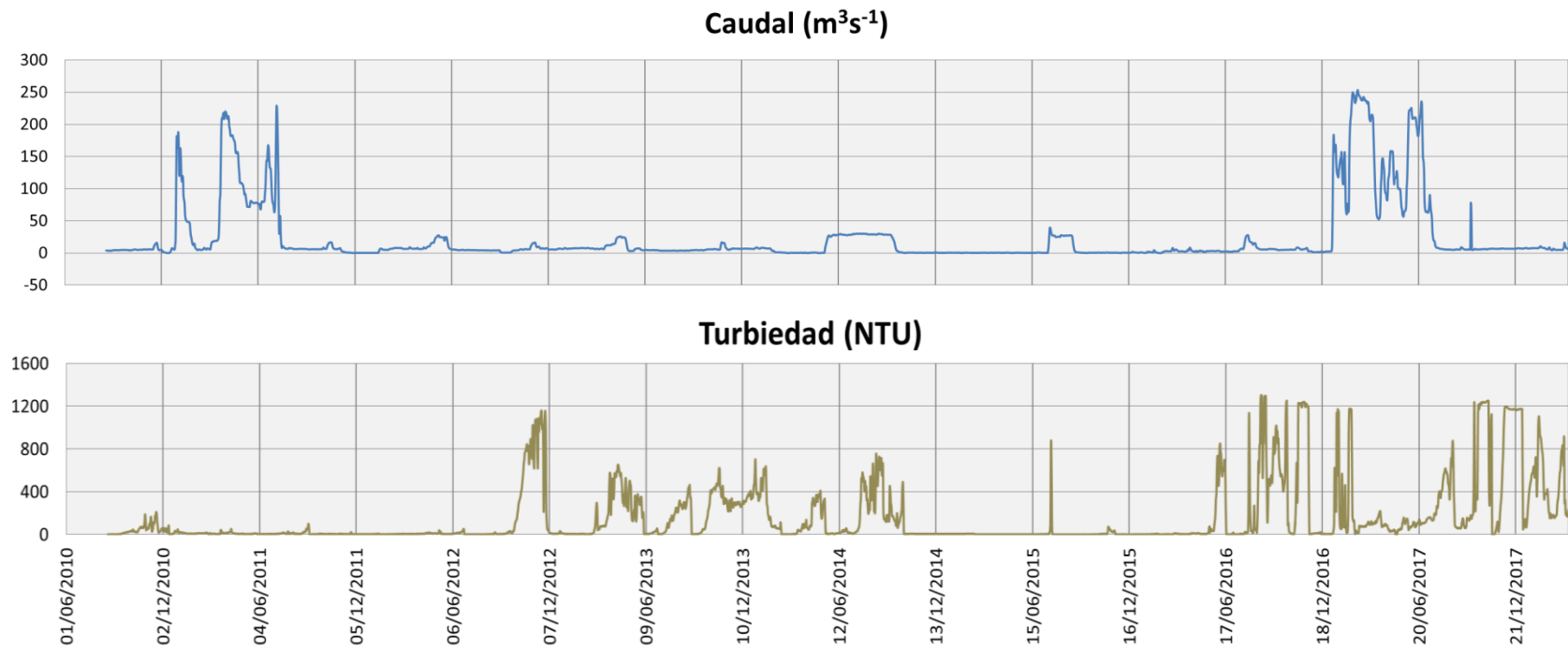


Figura 16. Serie de tiempo de tasas metabólicas diarias y datos auxiliares para el período 2010-2018

El caudal promedio del pulso presentado en el periodo 2010-2011 fue aproximadamente once (11) veces el caudal presentado para la misma época en el periodo 2011-2012 (ver Tabla 3). Comparando estos dos períodos en términos de las tasas metabólicas, el pulso del 2010-2011 generó una atenuación significativa en los parámetros GPP, ER y NEM (ver valores promedios y medianas), así como de su variabilidad para el período (ver desviaciones estándar de cada término). Esta información es soportada por otros parámetros como la temperatura, que experimentó una atenuación de aproximadamente 4°C, y la disminución en el valor del rango de OD para el período 2010-2011. La mayor turbidez en el tramo para el período 2010-2011 pudo haber influenciado la menor productividad en el período, a pesar de tener más altas concentraciones de clorofila.

Tabla 3. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal primer pulso fenómeno de La Niña.

	Fecha inicio	Fecha final	Número de días	Mediana	Promedio	Desviación estándar
<b>Caudal (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	18/12/2010	25/07/2011	220	<b>77.452</b>	<b>82.239</b>	<b>67.456</b>
Temperatura (°C)				12.074	12.826	3.497
Rango de OD (mg l <sup>-1</sup> )				0.600	0.646	0.357
<b>GPP (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)</b>				<b>1.033</b>	<b>1.104</b>	<b>0.663</b>
<b>ER (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)</b>				<b>0.248</b>	<b>0.560</b>	<b>0.744</b>
<b>NEM (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)</b>				<b>0.621</b>	<b>0.544</b>	<b>0.786</b>
Clorofila (Ug l <sup>-1</sup> )				11.153	13.518	12.114
Turbiedad (NTU)				8.069	10.348	7.445
<b>Caudal (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	18/12/2011	25/07/2012	221	<b>6.353</b>	<b>7.682</b>	<b>6.708</b>
Temperatura (°C)				16.012	16.013	7.091
Rango de OD (mg l <sup>-1</sup> )				0.800	0.951	0.464
<b>GPP (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)</b>				<b>1.385</b>	<b>11.159</b>	<b>21.508</b>
<b>ER (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)</b>				<b>0.385</b>	<b>1.094</b>	<b>2.168</b>
<b>NEM (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)</b>				<b>0.980</b>	<b>1.245</b>	<b>1.608</b>
Clorofila (Ug l <sup>-1</sup> )				1.749	3.959	10.292
Turbiedad (NTU)				4.722	5.718	5.049

Aunque los pulsos correspondientes al otoño de 2011, 2012 y 2013 se muestran en la Figura 16 como similares, estos presentaron diferencias importantes. El primer pulso, correspondiente al año 2011, presenta una duración de aproximadamente 30 días y se asocia a caudales altos ( $9.551 \pm 4.098 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) en comparación con el pulso del 2012 ( $7.221 \pm 3.954 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), y a caudales bajos en comparación con el pulso del 2013 ( $13.140 \pm 3.278 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Dadas las condiciones

antecedentes del tramo (gran pulso del 2010-2011), las tasas metabólicas para este período son menores que para el 2012 y el 2013, y tienen menor variabilidad. Mientras que el pulso de otoño del 2011 aún refleja condiciones autótrofas ( $NEM = 0.111 \pm 0.116 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ), los pulsos del otoño del 2012 y del 2013 resultan en condiciones heterótrofas ( $NEM = -0.040 \pm 0.581$  y  $-0.904 \pm 1.272 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente) (Tabla 4). Los altos valores de clorofila y turbiedad para los pulsos del 2012 y 2013 reflejan tendencias a la eutrofización en el tramo.

Tabla 4. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulsos pequeños de otoño 2011, 2012 y 2013.

	Fecha inicio	Fecha final	Número de días	Mediana	Promedio	Desviación estándar
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	28/09/2011	27/10/2011	30	<b>7.043</b>	<b>9.551</b>	<b>4.098</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				18.522	19.248	1.801
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.400	0.414	0.131
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.617</b>	<b>0.621</b>	<b>0.155</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.490</b>	<b>0.510</b>	<b>0.160</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.126</b>	<b>0.111</b>	<b>0.116</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				1.385	1.578	0.451
Turbiedad (NTU)				4.792	5.123	0.947
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	27/09/2012	21/11/2012	56	<b>5.727</b>	<b>7.221</b>	<b>3.954</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				16.051	17.140	3.591
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.600	0.645	0.214
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.935</b>	<b>1.003</b>	<b>0.441</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.919</b>	<b>1.043</b>	<b>0.538</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.190</b>	<b>-0.040</b>	<b>0.581</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				11.258	27.829	30.500
Turbiedad (NTU)				699.344	617.942	346.525
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	31/10/2013	11/11/2013	12	<b>15.238</b>	<b>13.140</b>	<b>3.278</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				13.630	13.651	0.338
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.300	0.358	0.132
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.452</b>	<b>0.498</b>	<b>0.248</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>1.081</b>	<b>1.403</b>	<b>1.187</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>-0.531</b>	<b>-0.904</b>	<b>1.272</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				103.229	102.605	13.043
Turbiedad (NTU)				329.505	331.852	49.809

Aunque los pulsos de primavera de los años 2012 y 2013 tuvieron duración y promedios similares (duración de 46 y 44 días, respectivamente; promedios de  $18.478 \pm 6.608$  y  $17.675 \pm 5.932 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ),

las medianas de cada pulso fueron diferentes ( $20.313 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para el 2012 y  $14.604 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para el 2013) (Tabla 5). Esto, y la acumulada “decadencia” del ecosistema por falta de flujos altos y continuos, hizo que el pulso de la primavera del 2012 resultara en condiciones autótrofas ( $\text{NEM} = 1.428 \pm 0.817 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , mediana = 1.014) mientras que el pulso de primavera del 2013 resultó en condiciones heterótrofas ( $\text{NEM} = -0.604 \pm 1.825 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , mediana = -0.024). La variabilidad de cada uno de los estimativos de MCA fue mucho más alta para el pulso de primavera del 2013 y, como lo indican los valores de NEM previamente mencionados, las tasas de ER del ecosistema sobrepasaron significativamente las de GPP en este período. Las altas tasas de turbiedad para el período 2013 pudieron haber influenciado la baja productividad en el sistema (vía reducción de PAR disponible para procesos fotosintéticos).

Tabla 5. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulsos pequeños de 2012 y 2013.

	Fecha inicio	Fecha final	Número de días	Mediana	Promedio	Desviación estándar
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	18/04/2012	02/06/2012	46	<b>20.313</b>	<b>18.478</b>	<b>6.608</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				17.671	18.461	1.435
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.600	0.653	0.133
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>1.147</b>	<b>1.837</b>	<b>0.358</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.055</b>	<b>0.410</b>	<b>0.628</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>1.014</b>	<b>1.428</b>	<b>0.817</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				1.960	2.523	0.480
Turbiedad (NTU)				10.534	9.957	6.594
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	24/03/2013	06/05/2013	44	<b>14.604</b>	<b>17.675</b>	<b>5.932</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				16.319	16.163	1.143
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.400	0.397	0.126
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.727</b>	<b>0.885</b>	<b>0.850</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.762</b>	<b>1.489</b>	<b>2.073</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>-0.024</b>	<b>-0.604</b>	<b>1.825</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				1.255	58.458	89.971
Turbiedad (NTU)				453.458	409.956	163.928

Los pulsos de verano de los años 2014 y 2015 permiten un análisis interesante. A pesar de que el pulso del 2014 tuvo una duración mayor (136 días) en comparación con el pulso del 2015 (50 días), y que los caudales vertidos al río desde el embalse fueron aproximadamente iguales (ver Tabla 6), la calidad del agua vertida no lo fue. Esto se evidencia por los valores de turbiedad del agua que fueron mucho más altos en el pulso del 2014. La revisión de los valores de turbidez del



agua inmediatamente aguas abajo de la represa Friant (punto de inicio del tramo de restauración) confirma que las condiciones de turbiedad del agua fueron mucho más altas para el pulso del 2014. Esta situación generó bajas tasas de GPP durante el pulso del 2014, comparadas con las del pulso del 2015, por lo que el parámetro concluyente, NEM, muestra condiciones heterotróficas a neutras durante el pulso del 2014 ( $NEM = -0.442 \pm 2.537 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , mediana = -0.024) y condiciones autotróficas durante el pulso del 2015 ( $NEM = 1.062 \pm 2.150 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , mediana = 0.578).

Tabla 6. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulsos prolongados de 2014 y 2015.

	Fecha inicio	Fecha final	Número de días	Mediana	Promedio	Desviación estándar
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	17/05/2014	29/09/2014	136	<b>28.568</b>	<b>27.359</b>	<b>4.477</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				21.062	20.802	1.256
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.400	0.424	0.128
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.722</b>	<b>0.733</b>	<b>0.253</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.770</b>	<b>1.175</b>	<b>2.569</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>-0.024</b>	<b>-0.442</b>	<b>2.537</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				23.078	39.315	48.451
Turbiedad (NTU)				121.474	194.582	219.695
<b>Caudal (<math>\text{m}^3 \text{ s}^{-1}</math>)</b>	16/07/2015	03/09/2015	50	<b>27.046</b>	<b>25.791</b>	<b>5.853</b>
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )				22.349	22.234	1.188
Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )				0.200	1.447	2.038
<b>GPP (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>1.329</b>	<b>1.795</b>	<b>1.901</b>
<b>ER (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.638</b>	<b>0.734</b>	<b>0.584</b>
<b>NEM (<math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}</math>)</b>				<b>0.578</b>	<b>1.062</b>	<b>2.150</b>
Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )				386.079	319.865	172.304
Turbiedad (NTU)				0.198	33.749	145.069

En la Tabla 7 se presentan los valores de caudal y tasas de MCA para el pulso prolongado del 2014, pero se incluyen también las tasas y datos correspondientes a un período previo y posterior a dicho pulso (50 días antes y 50 días después del pulso), con el ánimo de indagar sobre el efecto de éste en las condiciones metabólicas del tramo. El pulso fue significativo teniendo en cuenta que los caudales fueron de  $0.303 \pm 0.191$ ,  $27.359 \pm 4.447$  y  $0.778 \pm 0.929$  para los períodos antes, durante y después del pulso, respectivamente. El pulso amortiguó los cambios de temperatura propios del verano haciendo que la temperatura promedio antes y durante el pulso fuera aproximadamente la misma. El efecto principal del pulso fue reducir las

tasas de ER en el ecosistema, lo que permitió una transición de condiciones heterotróficas en el período previo al pulso (NEM =  $-2.096 \pm 5.983$ , mediana =  $-0.238$ ), a condiciones casi neutras durante el pulso, es decir, un balance entre las tasas de GPP y ER (NEM =  $-0.442 \pm 2.537$ , mediana =  $-0.024$ ). Esto, a pesar de que la turbiedad del sistema siguió siendo alta. Una vez finalizado el pulso, las tasas de respiración vuelven a aumentar significativamente, originando condiciones heterotróficas en el tramo (NEM =  $-3.941 \pm 10.300$ , mediana =  $-0.341$ ).

Tabla 7. Estadísticos de estimativos de MCA y caudal para pulso prolongado de 2014 (antes, durante y después).

	Fecha inicio	Fecha final	Número de días	Mediana	Promedio	Desviación estándar
<b>Caudal <math>m^3 s^{-1}</math></b>	28/03/2014	16/05/2014	50	<b>0.246</b>	<b>0.303</b>	<b>0.191</b>
Temperatura °C				20.870	21.310	2.454
Rango de OD ( $mg l^{-1}$ )				0.900	0.976	0.429
<b>GPP</b>				<b>0.754</b>	<b>0.910</b>	<b>0.720</b>
<b>ER</b>				<b>1.112</b>	<b>3.006</b>	<b>6.458</b>
<b>NEM</b>				<b>-0.238</b>	<b>-2.096</b>	<b>5.983</b>
Clorofila				7.411	19.296	20.423
Turbiedad				153.823	189.027	125.943
<b>Caudal <math>m^3 s^{-1}</math></b>	17/05/2014	29/09/2014	136	<b>28.568</b>	<b>27.359</b>	<b>4.477</b>
Temperatura				21.062	20.802	1.256
Rango de OD ( $mg l^{-1}$ )				0.400	0.424	0.128
<b>GPP</b>				<b>0.722</b>	<b>0.733</b>	<b>0.253</b>
<b>ER</b>				<b>0.770</b>	<b>1.175</b>	<b>2.569</b>
<b>NEM</b>				<b>-0.024</b>	<b>-0.442</b>	<b>2.537</b>
Clorofila				23.078	39.315	48.451
Turbiedad				121.474	194.582	219.695
<b>Caudal <math>m^3 s^{-1}</math></b>	30/09/2014	18/11/2014	50	<b>0.425</b>	<b>0.778</b>	<b>0.929</b>
Temperatura				17.236	17.988	3.267
Rango de OD ( $mg l^{-1}$ )				0.700	0.751	0.276
<b>GPP</b>				<b>0.499</b>	<b>0.581</b>	<b>0.335</b>
<b>ER</b>				<b>1.042</b>	<b>4.522</b>	<b>10.261</b>
<b>NEM</b>				<b>-0.341</b>	<b>-3.941</b>	<b>10.300</b>
Clorofila				1.193	17.025	31.401
Turbiedad				6.187	58.432	109.723

## 6.4 Discusión

La continuidad en el monitoreo de propiedades físico-químicas de corrientes hídricas es vital para entender el comportamiento de estos ecosistemas ante fenómenos naturales y antrópicos. Los procesos de restauración requieren continuidad en la información recolectada de indicadores para evaluar su éxito (Arroita, Elosegí, & Hall, 2018). Efectivamente, para el caso de este trabajo de grado, la ausencia de OD para algunos días del período de evaluación, afectó la posibilidad de analizar la relación entre pulsos de caudal y estimativos de MCA para estos casos.

Aunque en principio el esfuerzo de restauración tenía programado unos tipos específicos de pulsos, factores naturales y antrópicos resultaron en tres tipos diferentes de ellos: unos relacionados efectivamente con la restauración (años 2012 y 2013), otros relacionados con fenómenos climatológicos de gran escala (fenómeno de la niña de los períodos 2010-2011 y 2016-2017), y otros asociados a la dinámica de transferencia de agua para fines de riego en esta zona altamente agrícola (años 2014 y 2015). Los períodos que no tuvieron la presencia de pulsos de caudal se caracterizaron por tener caudales muy bajos, en algunos casos casi cercanos a  $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , dado que la mayoría del agua que se almacena en el embalse Millerton se desvía por canales a diferentes áreas del Valle Central de California. En conclusión, no hay un referente “natural” para los estimativos de MCA para este tramo de río. Los análisis que se hicieron en este trabajo se enfocaron en analizar la respuesta del MCA del tramo a pulsos del mismo tipo, a presencia/ausencia de pulsos para la misma época del año, o a evaluar MCA para períodos anteriores, durante y posteriores a un pulso.

Dado que no existe un referente natural para el sistema, no es posible decir que el río debe tener una condición autótrofa o heterótrofa por defecto. El análisis presentado se limitó a identificar los efectos que los pulsos tuvieron en las propiedades del agua y los estimativos de MCA para el tramo. En general, los grandes pulsos redujeron la temperatura del agua y los rangos diarios de OD. Además, atenuaron los estimativos de MCA tanto en magnitud como en su variabilidad. Los estimativos de MCA para los pulsos de restauración dependieron de la calidad del agua (turbiedad) y de las condiciones antecedentes del tramo. A medida que pasó el tiempo y aumentó el estrés por la presencia continua de caudales bajos, el sistema transicionó de condiciones autótrofas a heterótrofas. Finalmente, para el caso de los pulsos extendidos de verano, la calidad del agua (turbiedad) definió el potencial productivo del ecosistema (más que la duración del pulso). Independientemente de la calidad del agua, estos pulsos extendidos de verano

tuvieron un efecto positivo en el ecosistema al proveer un alivio al estrés producido por los continuos caudales bajos que se presentan en el río San Joaquín.

Los valores y las tendencias identificadas en este estudio tienen sustento en la literatura. Molla et al., (2006) demuestra que la variación del caudal entre periodos altera las tasas metabólicas. Estas variaciones se asocian a reducciones cuando se presentan flujos altos. Sin embargo, estas tasas tienden a recuperarse durante el periodo posterior de la inundación (Escoffier et al., 2018; Young & Huryn, 1996). Otros de los parámetros que afecta el MCA son la temperatura y las estaciones del año, ya que la respiración es mayor en verano en comparación con el invierno (Webster, Wallace, & Benfield, 1995), aunque no son tan significativas como los pulsos de caudal proporcionados (Marcarelli, Van Kirk, & Baxter, 2010), y datos auxiliares como turbiedad y clorofila los cuales se asocian a la eliminación de vegetación ribereña y al mayor suministro de sedimentos al río (Young et al., 2004).

## 7 CONCLUSIONES

Los datos disponibles a través de los sitios web de diferentes agencias, datos de calidad de agua, caudal y otros datos auxiliares fueron base fundamental para poder aplicar un método indirecto para el cálculo de MCA. La herramienta BASE permitió obtener series continuas diarias de los parámetros GPP, ER y NEM dentro del periodo de estudio (2010-2018).

La dinámica del caudal en el tramo del río San Joaquín permitió caracterizar tipos de pulsos que definieron tanto propiedades básicas del río (temperatura y rango de OD) como las tendencias en los parámetros de MCA (GPP, ER, NEM).

Los valores promedio, mediana y desviación estándar de los estimativos de MCA para los periodos asociados a cada uno de los pulsos permitieron definir el efecto que los pulsos tienen en cada uno de los parámetros.

Dada la variabilidad en los tipos de pulsos, la calidad del agua y el comportamiento acumulativo del ecosistema (dependencia de condiciones antecedentes), no fue posible identificar una única condición trófica para el tramo en evaluación (condiciones autotróficas vs. heterotróficas), sino un comportamiento variable que dependió de dichos factores, así como también de la época del año analizada. Sin embargo, es indispensable resaltar que, específicamente, los pulsos de caudal tuvieron efecto tanto en la magnitud de las tasas metabólicas como en la variabilidad de las mismas. Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura existente sobre el tema.

Los estimativos de MCA utilizados en este trabajo pueden tener dos fuentes de error. La primera está asociada a la calidad de los datos primarios obtenidos de fuentes institucionales. Estos datos se usaron partiendo de la idea de que fueron recolectados por personal idóneo, utilizando equipos correctamente calibrados, y de acuerdo a protocolos establecidos. La segunda, está asociada al proceso estadístico utilizado por la herramienta BASE para obtener los estimativos de MCA. Sería necesario hacer una validación de los parámetros estimativos por BASE y de las tasas metabólicas en campo para confirmar los estimativos obtenidos en este trabajo.

## 8 GLOSARIO Y ABREVIATURAS

- **105 Westlands:** estación de interés dentro del sitio web CDEC para la obtención de datos de radiación solar (California Department of Water Resources, 2015).
- **Autotrófico:** un ecosistema autotrófico es aquel que produce su propio alimento, es decir, tiene productividad primaria disponible para alimentar niveles tróficos superiores (ODUM, 1956).
- **BASE:** programa desarrollado por Grace et al. (2015) para estimar las tasas metabólicas de flujo total de una sola estación a partir de curvas de oxígeno disuelto (OD).
- **Biomasa:** cantidad de materia orgánica acumulada en un ecosistema la cual es utilizada como fuente energética (U.S. Energy Information Administration, 2018).
- **CDEC:** Centro de intercambio de datos de California (California Data Exchange Center), es el sitio web que proporciona datos hidrológicos de caudal, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica en tiempo real (California Department of Water Resources, 2015).
- **CIMIS:** California Irrigation Management Information System, es el sitio web que administra y proporciona los datos de radiación activa fotosintética (California Irrigation Management Information System., 2015).
- **Ecosistemas lóticos:** son los ecosistemas formados por las aguas corrientes, ríos y arroyos (Alan Yeakley et al., 2016).
- **Ecotono:** zona de transición donde se encuentran dos ecosistemas diferentes (Nilsson & Berggren, 2000).
- **ER:** respiración del ecosistema, donde los organismos dentro de un ecosistema específico utilizan el proceso de respiración para convertir el carbono orgánico en dióxido de carbono (Rodríguez, 2010).

- **Estimación bayesiana:** es una forma de obtener mejores predicciones de una muestra de datos, es decir, la estimación bayesiana es un tipo de inferencia estadística donde las evidencias se emplean para deducir que una hipótesis pueda ser cierta (Arrieta, 2017).
- **Eutrofización:** es el proceso que se da cuando las aguas de un río, lago o embalse se enriquecen en nutrientes, aunque aparentemente parezca bueno que las aguas estén llenas de nutrientes, el exceso de alimento puede afectar negativamente los procesos químicos y la dinámica de los ecosistemas acuáticos, ya que, crecen en abundancia las plantas y otros organismos, y más tarde cuando estos mueren, el proceso de putrefacción consume una gran cantidad de oxígeno disuelto y las aguas dejan de ser aptas para la mayoría de los seres vivos (Chapa & Guerrero, 2009).
- **Fotoperiodo:** es el tiempo diario en el cual un ser vivo se expone a la luz. El fotoperiodo es una de las condiciones externas que más condicionan a las plantas, ya que como organismos sésiles, deben sacar el máximo provecho a sus condiciones externas teniendo en cuenta que no pueden desplazarse para buscar otras mejores (Contreras, 2016).
- **GPP:** producción primaria bruta, es la energía total fijada en la fotosíntesis por las plantas (Young et al., 2004).
- **GRF:** estación Gravelly Ford del sitio web CDEC, proporciona datos de caudal, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (California Department of Water Resources, 2015).
- **Heterotrófico:** un ecosistema heterotrófico es aquel que no puede formar su propio alimento, es decir, necesita más insumos de afuera del ecosistema para alimentar las tasas de respiración (ODUM, 1956).
- **KFAT:** Fresno Air Terminal, estación de interés del sitio web Mesowest la cual proporciona información de presión atmosférica (University of Utah, 2015).
- **MCA:** metabolismo de cauce abierto (ODUM, 1956).
- **MCMC:** Markov Chain Monte Carlo, es una técnica que estima mediante simulación la

expectativa de una estadística en un modelo complejo. Las secciones aleatorias sucesivas forman una cadena de Markov cuya distribución estacionaria es la objetivo. Es útil en modelos bayesianos complejos (Gilks, 2005).

- **Mesowest:** sitio web que proporciona el acceso a las observaciones meteorológicas actuales y las de tiempos anteriores en todo Estados Unidos (University of Utah, 2015).
- **NEM:** metabolismo neto del ecosistema, diferencia entre la producción primaria bruta y la respiración del ecosistema (Rodríguez, 2010).
- **Radiación activa fotosintética (PAR):** es la cantidad de radiación cuyo rango de longitudes de onda están comprendidos entre 0.4 y 0.7  $\mu\text{m}$ , además, son capaces de producir actividad fotosintética. Los valores del PAR son importantes como parámetro de entrada de energía en diversos procesos biológicos (Righini & Gallegos, 2005).



## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Acreman, M. C., & Dunbar, M. J. (2004). Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 861–876. <https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004>
- Alan Yeakley, J., Ervin, D., Chang, H., Granek, E. F., Dujon, V., Shandas, V., & Brown, D. (2016). Ecosystem services of streams and rivers. In *River Science* (pp. 335–352). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118643525.ch17>
- Arrieta, J. M. (2017). ¿Cómo funciona la inferencia bayesiana? – Data Science. Retrieved February 1, 2019, from <https://datascience.com.co/cómo-funciona-la-inferencia-bayesiana-dc4ad29d4697>
- Arroita, M., Elozegi, A., & Hall, R. O. (2018). Twenty years of daily metabolism show riverine recovery following sewage abatement. *Limnology and Oceanography*, 1–16. <https://doi.org/10.1002/lno.11053>
- Bott, T. L., Water, S., Brock, J., & Gregory, S. V. (1978). A Comparison of Methods for Measuring Primary Productivity and Community Respiration Streams. *Hydrobiologia*, (September 2014), 3–12. <https://doi.org/10.1007/BF00018681>
- California Department of Water Resources. (2015). California Data Exchange Center. Retrieved May 6, 2018, from <http://cdec.water.ca.gov/stalinfo.html>
- California Irrigation Management Information System. (2015). California Irrigation Management Information System - CIMIS, CA DWR, 2015. Retrieved May 6, 2018, from <http://www.cimis.water.ca.gov/Stations.aspx>
- Chapa, C., & Guerrero, R. (2009). *Eutrofización: abundancia que mata*. Retrieved from <http://bibliotecas.umar.mx/publicaciones/eutrofizacion.pdf>
- Chapra, S. (1991). Delta Method For Estimating Primary Production , Respiration , And Reaeration In Streams. *Environmental Engineering*, 9372(February), 640–655. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1991\)117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117)
- Contreras, R. (2016). Fotoperiodo | La guía de Biología. Retrieved February 1, 2019, from <https://biologia.laguia2000.com/fisiologia-vegetal/fotoperiodo>
- Cox, B. A. (2003). A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. *Science of the Total Environment*, 314–316(03), 303–334. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00062-7)
- Dynesius, M., & Nilsson, C. (1994). Fragmentation and flow regulation of river systems in the

- northern third of the world. *Science*, 266(5186), 753–762.  
<https://doi.org/10.1126/science.266.5186.753>
- Escoffier, N., Bensoussan, N., Vilmin, L., Flipo, N., Rocher, V., David, A., ... Groleau, A. (2018). Estimating ecosystem metabolism from continuous multi-sensor measurements in the Seine River. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23451–23467.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-7096-0>
- Furman, D. (1989). San Joaquin River riparian habitat below Friant Dam: preservation and restoration. *Proceedings of the California Riparian Systems Conference: Protection, Management, and Restoration for the 1990s. General Technical Report PSW-110*, 79–82.
- Gálvez, J. (2002). Restauración Ecológica: Conceptos Y Aplicaciones. *Serie Documentos Técnicos # 8*, 1(8), 1–23.
- Gilks, W. R. (2005). Markov Chain Monte Carlo. In *Encyclopedia of Biostatistics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a14021>
- Grace, M. R., Giling, D. P., Hladyz, S., Caron, V., Thompson, R. M., & Mac Nally, R. (2015). Fast processing of diel oxygen curves: Estimating stream metabolism with base (BAYesian single-station estimation). *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(3), 103–114.  
<https://doi.org/10.1002/lom.10011>
- Harwood, J., & Wilkin, D. (2016). La conexión entre respiración celular y fotosíntesis | CK-12 Foundation. Retrieved January 5, 2019, from <https://www.ck12.org/book/CK-12-Conceptos-de-Ciencias-de-la-Vida-Grados-6-8-en-Español/section/2.15/>
- Kéry, M. (2010). Introduction to WinBUGS for ecologists. *Academic Press*, 91, 1–300.
- Lake, P. S. (2003). Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biology*, 48(7), 1161–1172. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x>
- Major differences. (2014). Difference between Gross Primary Productivity and Net Primary Productivity | Major Differences. Retrieved January 5, 2019, from <https://www.majordifferences.com/2013/02/difference-between-gross-primary.html#.XDFWzVVKjIV>
- Malmqvist, B., & Rundle, S. (2002). Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, 29(2), 134–153. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000097>
- Marcarelli, A., Van Kirk, R., & Baxter, C. (2010). Predicting effects of hydrologic alteration and climate change on ecosystem metabolism in a western U.S. river. *Ecological Applications*, 20(8), 2081–2088.
- Mcbridel, G. B. (2002). Calculating Stream Reaeration Coefficients from Oxygen Profiles : o.

- Environmental Engineering*, 9372, 4–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128)
- Meek, D. W., Hatfield, J. L., Howell, T. A., Idso, S. B., & Reginato, R. J. (1984). A Generalized Relationship Between Photosynthetically Active Radiation and Solar Radiation.
- Mollá, S., Robles, S., & Casado, C. (2006). Seasonal variability of particulate organic matter in a mountain stream in central Spain. *International Review of Hydrobiology*, 91(5), 406–422. <https://doi.org/10.1002/iroh.200510857>
- Naiman, R. J., Latterell, J. J., Pettit, N. E., & Olden, J. D. (2008). Flow variability and the biophysical vitality of river systems. *Comptes Rendus - Geoscience*, 340(9–10), 629–643. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.01.002>
- Nilsson, C., & Berggren, K. (2000). Alterations of Riparian Ecosystems Caused by River Regulation. *BioScience*, 50(9), 783–792.
- NOAA's, C. P. C. (2004). NOAA's Climate Prediction Center. Retrieved from [http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- ODUM, H. T. (1956). Primary Production in Flowing Waters<sup>1</sup>. *Limnology and Oceanography*, 1(2), 102–117. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.2.0102>
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., ... Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>
- Righini, R., & Gallegos, H. G. (2005). ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA Y LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN SAN MIGUEL, PROVINCIA DE BUENOS AIRES. Retrieved from [http://www.gersol.unlu.edu.ar/trabajos/arti017\\_05.pdf](http://www.gersol.unlu.edu.ar/trabajos/arti017_05.pdf)
- Riley, A. J., & Dodds, W. K. (2013). Whole-stream metabolism: strategies for measuring and modeling diel trends of dissolved oxygen. *Freshwater Science*, 32(1), 56–69. <https://doi.org/10.1899/12-058.1>
- Rodríguez, T. (2010). Tesis doctoral: Determinación de patrones espacio-temporales del funcionamiento ecosistémico en ríos de la vertiente Atlántica. *Universidad de Catambria*.
- San Joaquin River Restoration Program. (2015). Monitoring Data. Retrieved December 14, 2018, from <http://www.restoresjr.net/>
- Seavy, N. E., Gardali, T., Golet, G. H., Griggs, F. T., Howell, C. A., Kelsey, R., ... Weigand, J. F. (2009). Why climate change makes riparian restoration more important than ever: Recommendations for practice and research. *Ecological Restoration*, 27(3), 330–338.

<https://doi.org/10.3368/er.27.3.330>

- The Open University. (2014). Potable water treatment: 3.2 Dissolved oxygen. Retrieved January 14, 2019, from <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-and-technology/technology/potable-water-treatment/content-section-3.2#>
- U.S. Board on Geographic Names, B. (2018). Fork San Joaquin River. Retrieved January 4, 2019, from <https://geonames.usgs.gov/>
- U.S. Energy Information Administration. (2018). Biomass - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy. Retrieved January 31, 2019, from [https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass\\_home](https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_home)
- U.S. Fish & Wildlife Service. (2017). San Joaquin River Restoration, Bay-Delta Fish & Wildlife Office. Retrieved January 14, 2019, from <https://www.fws.gov/sfbaydelta/Fisheries/SanJoaquinRiverRestoration/Index.htm>
- University of Utah. (2015). MesoWest. Retrieved May 6, 2018, from <http://mesowest.utah.edu/cgi-bin/droman/mesomap.cgi?state=CA&rawsflag=3>
- Users Authority, F. W., & Defense Council, N. R. (2002). San Joaquin River Restoration Study. *Water*, (December).
- Villamizar, S. R., Pai, H., & Harmon, T. C. (n.d.). Producing long-term series of whole-stream metabolism using readily available data to assess river ecosystem response to flow disturbances.
- Ward, J. V., & Stanford, J. A. (1995). Ecosystems and Its Disruption By Flow Regulation. *Regulated Rivers: Research & Management*, *11*(July 1994), 105–119. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450110109>
- Webster, J., Wallace, J., & Benfield, E. (1995). Organic processes in streams of the eastern United States. *Ecosystems of the World: River and Stream Ecosystems*, *22*(January 1995), 117–187. <https://doi.org/citeulike-article-id:6945780>
- Wilcock, R., Nagels, J., McBride, G., Collier, K., Wilson, B., & Huser, B. (1998). Characterisation of lowland streams using a single-station diurnal curve analysis model with continuous monitoring data for dissolved oxygen and temperature. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, *32*(1), 67–79. <https://doi.org/10.1080/00288330.1998.9516806>
- Young, & Huryn, A. D. (1996). Interannual variation in discharge controls ecosystem metabolism along a grassland river continuum. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *53*(10), 2199–2211. <https://doi.org/10.1139/f96-186>
- Young, R., Collier, K., Waikato, E., & Strickland, R. (2006). Spatial Variation In Functional

Indicators For Non-Wadeable Streams Non-Wadeable Streams Reviewed by : *Environment*, (July).

Young, R. G., Matthaei, C. D., & Townsend, C. R. (2008). Organic matter breakdown and ecosystem metabolism: functional indicators for assessing river ecosystem health. *Journal of the North American Benthological Society*, 27(3), 605–625. <https://doi.org/10.1899/07-121.1>

Young, Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2004). Functional indicators of river ecosystem health – an interim guide for use in New Zealand. *Measurement*, (870), 60pp.

## 10 ANEXOS

### 10.1 Anexo 1: entrada a BASE

El archivo de entrada a BASE (entrada a BASE.csv) contiene siete columnas marcadas con los siguientes nombres:

- Date (dd/mm/yyyy)
- Time (h:mm)
- I (PAR; en  $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- tempC (en grados Celsius)
- DO.meas (en  $\text{mg l}^{-1}$ )
- atmo.pressure (atmosferas)
- salinity (ppt).

En color verde se encuentran resaltadas las fechas que no tienen valores buenos para OD pero se pusieron teniendo en cuenta que el modelo necesita de un archivo .csv continuo.

Para tener acceso a los datos abra el Link: [https://upbeduco-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/dany\\_hernandez\\_2013\\_upb\\_edu\\_co/EaPUEQ1aiQNPnQKpa41RGUwBDMau-T\\_XoX2N-uy9KDJNaQ?e=xaWP0F](https://upbeduco-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/dany_hernandez_2013_upb_edu_co/EaPUEQ1aiQNPnQKpa41RGUwBDMau-T_XoX2N-uy9KDJNaQ?e=xaWP0F)

### 10.2 Anexo 2: Output de BASE

BASE proporciona un archivo .csv de los resultados obtenidos (BASE\_results.csv), este archivo contiene 25 columnas por 2782 filas que contienen datos de tasas metabólicas y estadísticos. Dentro del archivo se encuentran casillas vacías teniendo en cuenta que para esas fechas no se encuentran disponibles los valores de OD.

Para tener acceso a los datos abra el Link: [https://upbeduco-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/dany\\_hernandez\\_2013\\_upb\\_edu\\_co/ERk19csvSG5Ds1UhrMqv\\_i0IBR7wKvbYeg5qMpTtYr5MPpQ?e=pMiRL6](https://upbeduco-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/dany_hernandez_2013_upb_edu_co/ERk19csvSG5Ds1UhrMqv_i0IBR7wKvbYeg5qMpTtYr5MPpQ?e=pMiRL6)

### 10.3 Anexo 3: Datos auxiliares

El documento con datos auxiliares (Datos auxiliares.xls) contiene columnas con valores de:

- Fecha (dd/mm/yyyy)
- Caudal ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Rango de OD ( $\text{mg l}^{-1}$ )
- Turbidez (NTU)
- Clorofila ( $\text{Ug l}^{-1}$ )

El documento tiene casillas vacías para los datos que no se encuentran disponibles.

Para tener acceso a los datos abra el Link: [https://upbeduco-my.sharepoint.com/:x/g/personal/dany\\_hernandez\\_2013\\_upb\\_edu\\_co/EZzOsP1vGulCmT4no8gNsY4BZTkjJ9VAvbMTd0c05wDGGA?e=vfDAkE](https://upbeduco-my.sharepoint.com/:x/g/personal/dany_hernandez_2013_upb_edu_co/EZzOsP1vGulCmT4no8gNsY4BZTkjJ9VAvbMTd0c05wDGGA?e=vfDAkE)