



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

CARACTERIZACIÓN ESPACIO – TEMPORAL DE LA ESTRUCTURA TÉRMICA DEL EMBALSE PORCE II

Daniel Camilo Largo Gaviria

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2011

CARACTERIZACIÓN ESPACIO – TEMPORAL DE LA ESTRUCTURA TÉRMICA DEL EMBALSE PORCE II

DANIEL CAMILO LARGO GAVIRIA

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería Recursos hidráulicos

Director:

Ph.D., Evelio Andrés Gómez Giraldo

Codirector:

Ph.D., Francisco Mauricio Toro Botero

Línea de Investigación:

Calidad del Agua

Grupo de Investigación:

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos - PARH

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio ambiente

Medellín, Colombia

2011

*el apasionamiento frente a algunas cosas
desnuda nuestra ceguera frente a otras, pero qué se le va ha hacer...
la meta es la pasión.*

Agradecimientos

Nada de lo que está en este documento lo podría haber plasmado si el camino no me hubiera llevado hasta la Universidad de Antioquia, si no hubiera conocido profesores tan especiales como Nora Elena Villegas y Álvaro Wills Toro, en quienes vi destellos de lo que llamamos *amor al arte*, si no hubiera tenido en Ingeniería Sanitaria compañeras como las que tuve, tenaces, si los profesores de la Universidad de Antioquia como María Teresa Flores y Jaime Palacio, y de la Universidad Nacional, como Francisco Mauricio Toro y Andrés Gómez Giraldo, y el funcionario de EPM Winston Cuellar, no se hubieran esforzado por sacar un proyecto de tal envergadura, que cobijara a tantos estudiantes. Nada hubiera podido hacer, si al llegar a la Universidad Nacional, no hubiera tenido al lado a Juan David Franco, a Ricardo Román y a Hugo Escorcía, de ellos dependió gran parte de mi aprendizaje y el desarrollo de este trabajo.

Ahora recuerdo con cariño los Nictemerales y todas las personas que nos vimos y compartimos un tintico cargadito en noches lluviosas pero siempre maravillosas, imposibles de olvidar. Saludo también a los de la oficina, a las tardes de frías, tardes de estrés y tardes de risas.

Finalmente, nada que hacer sin la compañía y apoyo de mis padres, mi hermano, mi hermana, mis amigos y a mi mejor amiga y mi amor, Marcelita.

Formalmente agradezco al Centro de Investigación del Agua CWR por permitir la utilización del modelo ELCOM, y a las Empresas Públicas de Medellín EPM por el financiamiento y apoyo en las labores del proyecto.

Resumen

En este trabajo se estudió la estructura térmica del embalse Porce II, ubicado en el departamento de Antioquia, Colombia, mediante el análisis de información secundaria, información obtenida en tres campañas de campo en 2010 y el modelo numérico ELCOM. Durante las campañas se midieron perfiles con CTD y variables climatológicas. El ELCOM se calibró con datos de la primera campaña de campo y se validó con información de la tercera campaña.

Fue posible describir la pluma de entrada del río Porce al embalse durante las tres campañas de campo. La temperatura del embalse Porce II es controlada por el río Porce y por las condiciones de generación de energía hidroeléctrica.

Palabras claves: embalse Porce II, estructura térmica, limnología física y modelos numéricos.

Abstract

In this work we studied the thermal structure of the Porce II reservoir, in department of Antioquia, Colombia. We used secondary information, which was collected during three fieldwork in 2010 and the numerical model ELCOM. During the fieldwork it was measured profiles with CTD and climatological variable. The ELCOM was calibrated with the data of the first monitoring and was validated with information of the third monitoring.

It was possible describe the density current of the Porce river into the reservoir during the three fieldwork. The temperature of the reservoir Porce II it was controlled by the river Porce II and the conditions of hydropower energy generation.

Keywords: Porce II reservoir, termal structure, physical limnology and numerical models.

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Introducción	1
1. Planteamiento del problema y objetivos.....	5
1.1 Situación.....	5
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
2. Marco teórico	7
2.1 Procesos superficiales.....	7
2.1.1 Flujos de calor	7
2.1.2 Viento.....	11
2.2 Tiempo de retención hidráulica	14
2.2.1 Caudales de entrada y salida.....	16
2.3 Modelos numéricos	20
3. Área de estudio	23
4. Datos y metodología.....	28
4.1 Información secundaria.....	28
4.1.1 Topografía y batimetría	28
4.1.2 Clima e hidrología	29
4.2 Información primaria.....	34
4.2.1 Desarrollo del trabajo de campo.....	35
4.3 Simulación numérica	39
4.3.1 Análisis de sensibilidad.....	40
4.3.2 Calibración del modelo	41
4.3.3 Validación del modelo	48
5. Resultados y análisis.....	49
5.1 Campo de viento	49
5.2 Descripción general de las campañas de campo.....	56

5.3	Pluma de entrada del río Porce en las campañas de campo.....	59
5.3.1	Primera campaña	60
5.3.2	Segunda campaña.....	76
5.3.3	Tercera campaña de campo.....	79
5.3.4	Posible explicación para la desaparición de la termoclina observada en la primera campaña a 40 metros de profundidad.....	86
5.4	Procesos superficiales.....	88
5.5	Simulación numérica	91
5.5.1	Calibración del modelo	91
5.5.2	Validación del modelo	98
6.	Conclusiones y recomendaciones	101
6.1	Conclusiones.....	101
6.1.1	Campo de viento	101
6.1.2	Pluma de entrada del río Porce.....	101
6.1.3	Procesos superficiales y generalidades	103
6.1.4	Simulación numérica	104
6.2	Recomendaciones.....	106
	Bibliografía.....	107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1: ubicación del embalse Porce II	26
Figura 3-2: estructuras de la presa. Modificado de Ingeniería de Presas. EPM 2008.....	27
Figura 4-1: cuencas de las quebradas Guaduas y La Cancana.....	31
Figura 4-2: estaciones estáticas y puntos monitoreados durante las tres campañas de campo.	39
Figura 4-3: ajuste de caudales de entrada y salida al embalse.....	43
Figura 4-4: simulación variando la temperatura del río Porce.....	45
Figura 4-5: cubrimiento de macrófitas en el embalse durante a) la primera de campo, b) la segunda y c) la tercera campaña de campo.	46
Figura 4-6: simulaciones variando la magnitud del viento.....	46
Figura 4-7: simulaciones variando el coeficiente de extinción	47
Figura 5-1: rosas de viento mensuales multianuales de registros entre 2001 y 2010 en la estación climatológica El Mango.....	50
Figura 5-2: comportamiento general del viento sobre la presa. Promedios horarios mensuales multianuales para magnitud del viento (Vv) y mayor frecuencia horaria mensual multianual para dirección del viento en el embalse Porce II, de registros entre 2001 y 2010 en la estación climatológica El Mango.....	51
Figura 5-3: comparación entre las direcciones de viento registradas en la estación El Mango (punto rojo) y las direcciones del viento registradas en dos estaciones flotantes (puntos verdes). En el panel superior se compara la estación El Mango con la estación Flotante Presa. En el panel inferior se compara la estación El Mango con la estación Flotante Isla. .	52
Figura 5-4: comparación entre magnitudes de viento registradas en 2008 entre la estación El mango, puntos negros, y la estación Flotante - Presa, rombos. En el panel superior se comparan las magnitudes provenientes del Noroccidente, en el panel inferior se comparan las magnitudes del suroriente.....	53
Figura 5-5: comparación entre magnitudes de viento registradas en 2010 entre la estación El mango (puntos negros), y la estación Flotante - Isla (rombos). En el panel superior se comparan las magnitudes provenientes del Noroccidente, en el panel inferior se comparan las magnitudes provenientes del suroriente.....	53
Figura 5-6: estaciones climatológicas reales en (verde) y virtuales (azul).....	56

Figura 5-7: perfiles medidos durante las tres campañas de campo en las estaciones estáticas.
57

Figura 5-8: variables climatológicas e hidrológicas registradas en la estación el Mango durante la primera (azul), la segunda (verde) y la tercera (negra) campaña.....58

Figura 5-9: temperatura (a) del río Porce, (b) caudales del río Porce y niveles del embalse Porce II.....60

Figura 5-10: ubicación de estaciones, cortes transversales, y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de abril de 2010.....62

Figura 5-11: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 16 de abril de 2010.
65

Figura 5-12: velocidades longitudinales, paneles a) y c), y transversales, paneles b) y d) en las estaciones PE08 y PE12, respectivamente. Para las velocidades longitudinales los valores negativos indican que el agua va hacia el occidente, los positivos, que va hacia el oriente. Para las velocidades transversales los valores negativos indican que el agua va hacia el norte; los valores positivos que va hacia el sur.66

Figura 5-13: tiempo de retención hidráulica para tres profundidades en la estación PE08 (a=920,b=900 y c=880 m.s.n.m) y en la estación PE12 (d=920,e=900 y f=880 m.s.n.m), además el caudal del río Porce (g). La franja gris sombrea los días de la campaña.67

Figura 5-14: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto transversal el 15 de abril de 2010 cerca de la estación PE08.69

Figura 5-15: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto transversal el 15 de abril de 2010 cerca de la estación PE11.70

Figura 5-16: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 13 de abril de 2010.
72

Figura 5-17: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal que atraviesa colchón de macrófitas el 16 de abril de 2010.....74

Figura 5-18: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de abril de 2010.
75

Figura 5-19: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de julio de 2010.	77
Figura 5-20: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de julio de 2010 que sale del brazo La Cancana.	78
Figura 5-21: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 30 de noviembre de 2010.	80
Figura 5-22: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 1 de diciembre de 2010.	81
Figura 5-23: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto transversal el 3 de diciembre de 2010.	82
Figura 5-24: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 1 de diciembre de 2010 que entra al brazo Guaduas.....	84
Figura 5-25: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 1 de diciembre de 2010 que sale del brazo La Cancana.	85
Figura 5-26: niveles del embalse Porce II y caudales del río Porce durante los primeros siete meses del 2010. Las franjas grises indican los momentos en los que se hicieron las campañas 1 y 2.....	87
Figura 5-27: perfiles medidos durante 24 horas en las estaciones PE08 y PE12.....	90
Figura 5-28: imagen del campo de viento aplicado para la calibración del modelo en seis momentos entre el 15 y el 16 de abril de 2010.....	93
Figura 5-29: comparación entre profundidades medidas con CTD y profundidades de batimetría utilizada en las simulaciones	95
Figura 5-30: comparación de perfiles generados a partir de diferentes mallas de cálculo y el perfil medido en PE06.	96
Figura 5-31: Simulación definitiva en el proceso de calibración.....	97
Figura 5-32: diferencias entre el nivel simulado y el nivel medido para la tercera campaña, validación.....	98
Figura 5-33: perfiles de temperatura simulados y medidos durante el proceso de validación.	99

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 4-1: coordenadas geográficas de las estaciones estáticas.	36
Tabla 5-1: factores de viento obtenidos del análisis entre la estación climatológica El mango y las estaciones flotantes.....	54
Tabla 5-2: Factores de viento aplicados a campo de viento.....	55
Tabla 5-3: coeficientes de extinción promediados por zonas calculados con la ecuación propuesta por Williams (1989)	94
Tabla 5-4. Variación de la temperatura del río Porce registrada con termistor en cuatro horas durante el primero de diciembre de 2010.	100

Introducción

El suministro de agua y la generación de energía para las personas hacen que la construcción de embalses sea una actividad necesaria y recurrente. El manejo de estas grandes cantidades de agua y sus posteriores implicaciones depende no solo de las condiciones hidrológicas y climáticas aferentes, sino también de los procesos físico-químicos y microbiológicos que surgen y se desencadenan en el embalse. Las empresas responsables de proveer estos servicios están interesadas en conocer y planificar el manejo de sus embalses, para ello deben comprender el sistema y tener poder de predicción, es decir, deben tener la capacidad técnica y operativa de prever escenarios y condiciones futuras. Igualmente, como un paso al frente está la capacidad de evocar y discernir sobre eventos pasados. Esta visión a futuro ha estado personificada por muchos años en ojos agudos de funcionarios especializados, y así será, pero ahora con la posibilidad de apoyar sus conocimientos en equipos de medición de alta tecnología y herramientas computacionales tipificadas por diversos modelos especializados. Estos equipos de medición facilitan la descripción de características hidrodinámicas, térmicas y biológicas de cuerpos de agua y los modelos especializados, posibilitan la exploración de probables escenarios y permiten un recorrido en el tiempo y en el espacio que no se puede hacer físicamente.

En los embalses, donde las velocidades son bajas y las profundidades altas, si se comparan con las de los ríos, se presentan diferentes tipos de procesos, dentro de los cuales está la estratificación térmica. La estructura térmica del embalse es el reflejo de sus características climáticas, hidrológicas, topográficas, físico-químicas, biológicas y de operación, conocidas en simulación numérica como agentes forzantes. Esta organización de las capas de agua por temperatura, y por lo tanto de densidad, afecta todos los procesos de transporte. Uno de ellos es la pluma de entrada, que quizás, para el embalse Porce II sea el principal.

Conociendo las características térmicas del embalse y de los afluentes se tendría una idea más aproximada del recorrido de éstos últimos dentro del embalse. Se sabría si viajan, por su densidad y momentum, hacia el fondo, por una zona intermedia o alcanzan la superficie. Ahora, si sumado a que se conoce el posible desplazamiento de los afluentes en el embalse, se tienen sus características de calidad de agua, es decir, si se sabe hacia dónde son llevados los nutrientes, el oxígeno disuelto, los sólidos, entre otros, se está más cerca de comprender los diferentes procesos físico-químicos y biológicos que se presentan en el embalse. A la pluma de entrada también se relaciona el tiempo de permanencia del agua en diferentes zonas, y esta retención o permanencia hidráulica se asocia a procesos de renovación de agua, degradación y generación de reacciones físico-químicas. Otro proceso de transporte que tiene que ver con la estructura térmica y la calidad del agua es la extracción selectiva. El fenómeno de la extracción selectiva está en función, entre otras, de la posición y tamaño de las compuertas para generación de energía. De ello dependerá el tipo de agua que será evacuada del embalse, y por lo tanto, la calidad del agua que permanecerá. Dependiendo de la temperatura del agua del embalse, y de algunos procesos climáticos se presentarán flujos verticales y horizontales de la masa de agua, movimientos que igualmente afectarán los procesos físico-químicos y biológicos.

El interés particular de este trabajo es entonces explicar la estructura térmica del embalse Porce II porque como se indicó, ésta afecta su hidrodinámica y más importante, su calidad del agua. Para ello se hicieron campañas de campo en las que se utilizó un perfilador de temperatura, turbidez y conductividad, y otros equipos que permitieron medir variables climatológicas. También se usó como herramienta de simulación numérica, el modelo ELCOM, por sus siglas en inglés, Estuary, Lake and Coastal Ocean Model.

En el embalse Porce II se han realizado diferentes estudios con el fin de conocer la dinámica de la estructura térmica (Villegas 2004, Ramos 2007). La metodología utilizada y los equipos de medición funcionan diferente. En comparación con los estudios señalados, en este trabajo se obtiene vasta información de campo, con ella se incrementa el nivel de análisis y se mejora en el aporte sobre el funcionamiento hidrodinámico del embalse, lo que hace una

de las principales diferencias. Se definió como objetivo principal la descripción de la estructura térmica del embalse con base en el comportamiento de la pluma del río Porce, como resultado del análisis de tres campañas de campo hechas en abril, julio y finales de noviembre e inicios de diciembre de 2010. Se calibró el ELCOM con la primera campaña y se validó con la tercera campaña. Se simula bajo dos condiciones climatológicas y de operación, porque el nivel del embalse Porce II cambia abruptamente por razones operacionales, no climatológicas.

1.Planteamiento del problema y objetivos

1.1 Situación

En Colombia, y en muchos países del mundo, la limnología se ha enfocado en el análisis de los procesos físico-químicos y biológicos de manera más rigurosa que como lo ha hecho en el estudio de los procesos hidrodinámicos, estos últimos ligados a la estructura térmica. Este hecho posiblemente ha limitado los alcances de los estudios, y las herramientas de los expertos al momento de explicar diferentes situaciones que se presentan en los cuerpos de agua.

Conocer la estructura térmica y sus forzantes permite entender mejor el movimiento del agua y las sustancias presentes en ella. Entender cómo será el desplazamiento del agua dentro del embalse servirá para saber qué tipo de agua llega y qué tipo de agua sale o es utilizada.

Este entendimiento podrá ser aplicado en la formulación de normatividad que abogue por el buen manejo ambiental de los lagos y embalses, también en el manejo interno de estos cuerpos de agua por parte de las empresas encargadas, que dependiendo del caso, serán más eficientes en el manejo de las plantas de tratamiento de agua potable, podrán proteger mejor las estructuras, establecerán zonas de mayor sedimentación, entre otras posibilidades.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar la dinámica de la estructura térmica del embalse Porce II mediante la realización y el análisis de campañas de campo y simulación numérica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los forzantes climáticos e hidrológicos de la estructura térmica.
- Identificar la variabilidad espacial y temporal del viento mediante la comparación de la medición de viento en diferentes puntos del embalse.
- Identificar la respuesta del embalse ante los forzantes con base a las mediciones de campo.
- Explicar el movimiento de la pluma del río Porce dentro del embalse basándose en los perfiles térmicos, de turbidez y de conductividad medidos en campo.
- Complementar el análisis de la información con la ayuda de un modelo hidrodinámico

2.Marco teórico

Los embalses son depósitos de agua construidos por el hombre, abastecidos por ríos o quebradas, cuyos propósitos principales son el suministro de agua, la generación de energía eléctrica y el control de inundaciones. Su construcción se basa en la interrupción controlada de la corriente y la consiguiente inundación de su cuenca. A continuación se presentan una corta descripción de los principales procesos físicos que modifican la evolución de la estructura térmica y los procesos de transporte en el embalse posterior a este llenado, es decir, durante la vida útil del embalse.

2.1 Procesos superficiales

La capa superficial, en muchos aspectos, es la zona más dinámica del cuerpo de agua. Dependiendo de las propiedades del aire, del viento, y de las ondas, la interface aire/agua crea un cuello de botella para el intercambio de las cantidades físicas tales como calor, energía cinética, momentum y materia (Wüest & Lorke 2003).

2.1.1 Flujos de calor

La radiación solar, o radiación de onda corta, es de fundamental importancia para comprender la dinámica de los ecosistemas de aguas dulces como los embalses. La absorción de energía solar tiene efectos importantes sobre la estratificación de la masa de agua y sus patrones de circulación (Wetzel 2001).

En la región ecuatorial, donde está el área de interés para esta investigación, la luz solar golpea verticalmente los cuerpos de agua y da entradas de energía relativamente constantes

a lo largo del año. Es decir, a diferencia de las demás latitudes, en el trópico las horas de sol y su intensidad son casi constantes durante todo el año. El alto calor específico del agua permite la acumulación de la energía lumínica como calor. En el balance de calor de un cuerpo de agua intervienen: a) el flujo de calor generado por la radiación de onda corta (q_{ROC}), que es función de la localización y de las condiciones atmosféricas del área de estudio; b) el calor generado por la radiación de onda larga (q_{ROL}), emitida por los objetos terrestres y la atmósfera; c) el flujo de calor latente (q_{Lat}), que es la energía asociada a los cambios de fase y depende de la temperatura superficial y de las condiciones atmosféricas; y d) el flujo de calor sensible (q_{Sen}), que es el intercambio de calor entre el agua y el aire. El flujo de calor es entonces:

$$q_n = q_{ROC} + q_{ROL} + q_{LAT} + q_{Sen} \quad (2-1)$$

La radiación de onda corta es:

$$q_{ROC} = H_o a_r (1 - R_{ROC}) (1 - 0,65 C_{Nub}^2) \quad (2-2)$$

Donde H_o es la cantidad de radiación solar que llega a la atmósfera de la tierra, R_{ROC} es el albedo o el coeficiente de reflexión para onda corta, a_r es la atenuación atmosférica (adimensional), y C_{Nub} es la fracción del cielo cubierta por nubes.

La radiación de onda larga es:

$$q_{ROL} = -\varepsilon_{agua} \sigma (273,2 + T_{agua})^4 + \varepsilon_{aire} \sigma (273,2 + T_{aire})^4 (1 - R_{ROL}) (1 + 0,17 C_{Nub}) \quad (2-3)$$

donde ε_{agua} y ε_{aire} son constantes adimensionales que definen la emisividad de la superficie del agua y del aire, respectivamente, σ es la constante de Stefan - Boltzmann. T_{agua} es la temperatura del agua, T_{aire} la temperatura del aire y R_{ROL} es el coeficiente de reflexión para onda larga.

El calor latente se puede obtener de:

$$q_{Lat} = L C_w u_{viento} \rho_{aire} (H_{aire} - H_{sup}) \quad (2-4)$$

donde L es el calor latente de evaporación del agua, C_w es el coeficiente adimensional de transferencia para evaporación, u_{viento} es la velocidad del viento, ρ_{aire} es la densidad del aire

en la superficie, H_{aire} y H_{sup} son la humedad específica a un nivel de referencia y la humedad específica en la superficie, respectivamente.

Y el calor sensible puede obtenerse de:

$$q_{Sen} = C_s C_p u_{viento} \rho_{aire} (T_{aire} - T_{agua}) \quad (2-5)$$

donde C_s es el coeficiente adimensional de transferencia de calor sensible, C_p es la capacidad calorífica específica a presión constante.

Durante el desarrollo de la investigación se estudiaron las anteriores ecuaciones. Como se mostrará más adelante, algunas variables fueron medidas en campo y usadas en el modelo numérico ELCOM. Si se desea conocer más sobre las ecuaciones de flujo de calor se puede consultar (Martin & McCutcheon, 1999) y para obtener información acerca de la aplicación de estos principios en el modelo numérico, consultar (Hodges & Dallimore 2006).

En el anterior balance de calor y en el modelo numérico, no se tiene en cuenta la presencia de macrófitas flotantes, quienes juegan un rol importante en el flujo de calor superficial. Las macrófitas, particularmente *Eichhornia Crassipes* presente en el embalse Porce II, reduce la penetración de ROC, la acción refrigerante del viento en la superficie del agua, y dado el microclima que forma bajo sus hojas, mantiene una temperatura ambiente promedio más elevada y un mayor grado de humedad (Linacre 1968; Van der Weert & Kamerling 1974). También, su presencia genera gradientes de temperatura entre la zona cubierta por las macrófitas y la zona adyacente descubierta. Al calentamiento que se presenta entre estas dos zonas adyacentes, una sombreada y otra expuesta se le conoce como calentamiento diferencial. Si las plantas cubren lo suficiente la superficie es posible que este calentamiento induzca intercambios de masa entre las dos zonas (Coates & Ferris 1994). Donde la vegetación está presente, la sombra reduce la estratificación térmica y crea una región de agua más fría durante el día, que establece un intercambio similar al de convección, pero con el agua dentro de la vegetación metiéndose en la zona descubierta a una profundidad y retornando cerca de la superficie. Es decir, durante el día, el agua más caliente de la zona expuesta fluye hacia la zona cubierta y el agua más fría de la zona cubierta, contrariamente,

fluye hacia la zona expuesta a una profundidad. Durante la noche, las direcciones son inversas porque el enfriamiento es más rápido en la zona expuesta. Estos intercambios se conocen como plumas de densidad generadas por procesos internos (Peeters & Kipfer 2009), dado que no son plumas relacionadas a afluentes, tema que será presentado más adelante.

- Coeficiente de extinción de la luz

Desde el punto de vista limnológico, solo es importante la luz que penetra en el agua, la cual está afectada por la latitud, la altitud, la época del año, la hora del día y las condiciones climáticas (Roldán & Ramírez 2008). La luz que penetra sufre dos procesos, absorción y dispersión. La absorción implica conversión de energía lumínica en energía química, en la fotosíntesis, y en calor. Cerca del 53% del total de la energía lumínica se transforma en calor en el primer metro (Wetzel 2001). Los detritos orgánicos e inorgánicos particulados y disueltos tienen baja absorción en el rojo y aumento de la absorción a medida que disminuye la longitud de onda. La dispersión, a diferencia de la absorción, es un cambio en la dirección de la luz, sin pérdida de energía. Este proceso tiene dos componentes. La dispersión producida por agua pura y la producida por las partículas suspendidas (Roldán & Ramírez 2008).

La combinación de la absorción y la dispersión origina la denominada atenuación de la luz en el agua, y se ajusta a la ley de Lambert-Beer la cual tiene la forma:

$$I_z = (I_o - I_{albedo})e^{-kz} \quad (2-6)$$

Donde I_z es la intensidad de la luz a una profundidad Z . I_o es la intensidad de la luz incidente, I_{albedo} es la intensidad de la luz reflejada y k es el coeficiente de atenuación vertical de la luz. (Roldán & Ramírez 2008). En los cuerpos de agua el coeficiente de atenuación de la luz cambia, al igual que las características del agua, temporal y espacialmente. Según observaciones de Straskraba (1998) en diferentes lugares, este coeficiente ejerce profundos efectos sobre la estratificación térmica (Han et al. 2000), es decir, sobre la forma en la que se reparte el calor en la columna de agua. Con el fin de entender cómo varía la penetración de la luz en las diferentes zonas del embalse Porce II se

midió la transparencia Secchi (Z_{ds}). Esta es una manera práctica y económica, de conocer el coeficiente de extinción de la luz. Con esta profundidad se estima que se alcanza aproximadamente entre $0.1(I_o - I_{albedo})$ o $0.2(I_o - I_{albedo})$. Sin embargo, lo ideal, dado que cada cuerpo de agua tiene sus características particulares, es medir perfiles de atenuación con foto-celdas, que miden la penetración de la luz en el agua y su atenuación con la profundidad (Roldán & Ramírez 2008).

Para obtener un valor de k a partir de la distancia Secchi, Wingberg (1976) recomienda la ecuación

$$k = \frac{2,6}{(Z_{ds} + 2,5)} - 0,0481 \quad (2-7)$$

Pool y Atkins (1976) proponen:

$$k = \frac{1,7}{Z_{ds}} \quad (2-8)$$

Como indican Roldán y Ramírez (Roldán & Ramírez 2008), la ecuación propuesta por Pool y Atkins fue obtenida para canales en territorio de Inglaterra, por lo que su validez no es universal.

Otra ecuación utilizada es la de Williams (1980):

$$k = 1,1Z_{ds}^{-0,75} \quad (2-9)$$

El valor de k es mayor en la región litoral que en la limnética, donde la atenuación es ejercida básicamente por el fitoplancton y el bacterioplancton (Martin & McCutcheon 1999). Las anteriores ecuaciones fueron aplicadas, como se indicará más adelante, para obtener valores del coeficiente de atenuación de la luz en diferentes zonas. Este valor esta información sirvió para la calibración del modelo.

2.1.2 Viento

El campo de viento sobre la superficie del cuerpo de agua es uno de los elementos clave en el intercambio de momentum y energía en la superficie libre. Este es raramente uniforme, con un grado considerable de variabilidad espacial. Las características topográficas son una

de las mayores contribuciones a dicha variabilidad. Considerar el movimiento superficial del agua a través del sistema muestra la importancia de la variabilidad espacial del viento no solo para determinar los patrones de circulación, sino también la biogeoquímica del sistema a través de la determinación del tiempo de residencia por zonas (Rueda et al. 2005).

Como afirman Imberger & Hamblin (1982) y muchos otros autores, el esfuerzo del viento sobre la superficie del agua τ genera un proceso de mezcla importante tanto en las capas superficiales como en las capas profundas (Imberger & Parker 1985). Este esfuerzo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau = \rho_a C_d u_{viento}^2 \quad (2-10)$$

Y la velocidad de fricción del viento sobre la superficie del agua u_* se calcula como:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \quad (2-11)$$

donde u_{viento} es la velocidad del viento, ρ_a es la densidad del aire y C_d es el coeficiente de arrastre, con un rango típico de valores entre 0.001 y 0.002 (extremo de 0.01).

El viento mezcla la columna de agua, mientras que la radiación solar introduce un flujo de boyancia que estabiliza la capa superficial. El efecto del esfuerzo de un viento variable puede ser dividido en tres fases distintas: un calentamiento diferencial, una profundización diferencial, y su consiguiente ajuste gravitacional. El calentamiento diferencial describe la variabilidad del flujo de calor en la superficie del sistema durante la fase de calentamiento. En horas de alta radiación solar, el flujo de calor latente, evaporación, representa una pérdida de energía, mientras que el flujo de calor sensible una ganancia (Jörg. Imberger & Parker 1985). Ambos flujos, el latente y el sensible se incrementan con la velocidad del viento, de tal manera que se espera que las zonas expuestas del embalse pierdan más calor que aquellas que están protegidas del efecto del viento, como las zonas cubiertas por macrófitas. Esta evaporación es más grande en cuerpos de agua calientes expuestos al mismo esfuerzo cortante del viento. Así, se predice que la profundidad de la capa de mezcla en los trópicos podría ser mayor a la que se da en los cuerpos de agua de zonas templadas de similar tamaño y penetración de la luz (Monismith & MacIntyre 2009).

La segunda fase, que es la profundización diferencial de la capa de mezcla, resulta cuando la capa superficial diurna, formada por el calentamiento matutino, es expuesta al esfuerzo del viento, desplazada y “amontonada” en alguna parte del embalse, dando lugar a una profundización de la capa de mezcla. La suma de los efectos del calentamiento y la profundización diferenciales establece gradientes horizontales que son compensados mediante la tercera fase, el ajuste gravitacional.

El ajuste gravitacional puede darse mientras el viento aún mezcla la región expuesta, o el viento podría cesar antes de que los movimientos horizontales se establezcan. De cualquier manera, el esfuerzo vertical asociado con la advección horizontal, provocados por ambos, el campo gravitacional o el esfuerzo del viento, podría combinarse con la mezcla vertical para producir una tasa de intercambio de dispersión horizontal (Fisher et al 1979) (Imberger & Parker 1985).

En los lagos o embalses donde el esfuerzo del viento es el forzante dominante, el primer rol de la vegetación acuática es reducir el avance del viento, la generación de ondas y atenuar la mezcla que induciría, entre otras que fueron mencionadas anteriormente. Este hecho fortalece la estratificación térmica y reduce la profundidad de la capa de mezcla superficial en comparación con las aguas abiertas (Folkard & Coates 2009).

La estratificación térmica es la respuesta que da el cuerpo de agua a los diferentes eventos que se presentan. Pueden ser eventos termodinámicos, como los generados por la radiación solar, o pueden ser hidrodinámicos, como los formados por las corrientes de densidad, el roce del viento, las ondas internas o la suma de los anteriores.

Los procesos en los lagos tropicales son determinados principalmente por alta radiación solar, calentamiento del agua con una intensificación de procesos microbiológicos, y bajas concentraciones de oxígeno (Gunkel & Casallas 2002). La variación estacional del clima no es significativa y se refleja principalmente en la intensidad de la lluvia.

El balance de calor es determinado por el ciclo diario. El calentamiento ocurre durante las horas de luz debido a la radiación solar, y el enfriamiento se da durante la noche debido a la

transferencia de calor a la atmósfera y a la mezcla temporal por viento, lo que conduce a mezcla convectiva nocturna.

Los lagos con profundidades menores de 100 metros en los trópicos, tienen débil estratificación en la mañana y las variaciones anuales en el calentamiento y enfriamiento son frecuentemente mínimas comparadas con la variación diurna de los forzantes. Es decir, la diferencias entre la temperatura superficial y la temperatura de fondo encontrada en los lagos templados no está presente en los lagos tropicales, y las variaciones anuales vistas en la estratificación en las zonas templadas pueden ocurrir en el lapso de un día en los trópicos. Así, el balance dinámico del calentamiento, enfriamiento, y la mezcla por viento varían con el tamaño del cuerpo de agua, la latitud y por la época, asociada a las lluvias en el trópico (Monismith & MacIntyre 2009).

La condición de estratificación y su consecuente división de las masas de agua, influencia factores del embalse tales como almacenamiento y disipación de calor, acumulación y transformación de componentes químicos afectando la química y los gradientes biológicos verticales. Además de reducir el intercambio vertical, la estratificación térmica puede impulsar el intercambio horizontal de agua forzado por una estructura vertical preferida (Branco et al. 2009).

2.2 Tiempo de retención hidráulica

Una característica de los cuerpos de agua que interviene en los procesos físicos, químicos y biológicos de manera sustancial es el tiempo de retención hidráulica o tiempo de residencia. El tiempo de residencia depende de los procesos de transporte y mezcla que ocurren en el sistema. Estos procesos no solo determinan la localización espacial de sustancias disueltas y suspendidas en cualquier momento, sino que también determinan las condiciones ambientales que controlan la ocurrencia de procesos bioquímicos (Rueda et al. 2006), como la estructura térmica del embalse.

Los caudales de entrada a los embalses están determinados por las condiciones climatológicas, pero las salidas se basan en la demanda de agua. Esta es una condición inherente de los embalses que los convierte en sistemas altamente complejos, y los separa de los lagos. Se conoce el tiempo de residencia (T_r) como el volumen total (V_t) del cuerpo de agua dividido por el caudal medio de entrada (Q_m).

$$T_r = \frac{V_t}{Q_m} \quad (2-12)$$

Si el tiempo de residencia es corto, de semanas, la calidad del agua en el embalse puede ser determinada principalmente por los afluentes, pero si el tiempo de residencia es largo, la actividad biológica en el embalse toma relevancia. Esta definición no tiene en cuenta el comportamiento hidrodinámico del embalse, no se tiene en cuenta la extracción, ni la existencia de cortos circuitos y zonas de poca circulación.

En los cuerpos de agua hay zonas de mayor flujo y zonas lentas o muertas, las cuales controlan en mayor o menor medida la permanencia, el movimiento, la entrada y salida de agua. Además, la estratificación impone fuertes restricciones a los movimientos del agua en la dirección vertical. La definición del tiempo de residencia, tiempo de lavado o “flushing” asume que el embalse actúa como un tanque reactor idealizado completamente mezclado, donde cualquier masa que se introduce es instantánea y uniformemente mezclada a través del dominio. En los embalses moderados a profundos asumir que se da una mezcla inmediata no es válido dado que en ellos se encuentran patrones complejos de mezcla. Por esta razón, la definición presentada del tiempo de residencia, es fundamentalmente incorrecta.

Una de las dificultades de utilizar la definición presentada del T_r es determinar el caudal y el volumen a emplear (Rueda 2006), cuál sería la escala temporal a promediar, una escala anual, mensual, semanal?. Rueda & Cowen (2005) revisaron los conceptos fundamentales de las escalas de tiempo del transporte en los sistemas acuáticos que se aplican a embalses, y

presentaron la siguiente aproximación para determinar el tiempo de retención hidráulica en los embalses,

$$T_r = \frac{1}{m_0} \int_0^{\infty} m(t) dt \quad (2-13)$$

Esta aproximación consiste en la inyección y llenado instantáneo de un cuerpo de agua con un trazador conservativo. Los trazadores son sustancias inertes, que se mueven en el cuerpo de agua sin reaccionar. Si luego de inyectar el trazador, en un momento t se determina la masa del trazador ($m(t)$), la relación entre la masa aplicada inicialmente (m_0) y $m(t)$ permitirá determinar qué cantidad de masa salió del cuerpo de agua. Ésta tasa de pérdida de agua refleja la velocidad a la cual el trazador deja el cuerpo de agua y da la distribución, en el tiempo, del tiempo de residencia. Este enfoque, basado en una descripción física del transporte se considera el más adecuado. Tiene en cuenta el efecto de la estratificación sobre el transporte y es independiente de la magnitud de las fluctuaciones del nivel o de la descarga (Rueda 2006).

El modelo matemático ELCOM, permite calcular el tiempo que lleva una partícula de agua en el embalse, tiempo que llamaron la edad del agua. Al iniciar la simulación todas las partículas arrancan con tiempo cero, y cada vez que una entra (caudales de entrada), lo hace con tiempo cero. Esta opción se utilizó en este trabajo para tener nociones de tiempos de viaje y de tiempos de residencia del agua en algunas zonas.

2.2.1 Caudales de entrada y salida

Los caudales afluentes y efluentes juegan un papel preponderante en el tiempo de retención hidráulica de los embalses, en la mezcla de sustancias, en el metabolismo de los cuerpos de agua y en su estructura térmica. Su entrada al embalse y salida, tienen características diferentes de acuerdo a su magnitud y densidad, y a la densidad del embalse. El proceso que se da debido a la entrada del río o fuente de abastecimiento al embalse se conoce como corriente de densidad o pluma de entrada y el de salida como extracción selectiva.

Estos dos procesos, afluentes con temperaturas diferentes a las de la superficie del embalse y efluentes a diferentes profundidades, son las principales fuentes de diferencias entre la hidrodinámica de un embalse y la de un lago. Usualmente, la temperatura de los afluentes es menor a la temperatura superficial de los embalses (Han et al. 2000).

La pluma de entrada es considerada como una de las mayores fuentes de mezcla dentro de los cuerpos de agua, por lo tanto, para perspectivas de manejo y de simulación es crucial que estos flujos sean bien entendidos (Dallimore et al. 2001).

Bell (1942) define una corriente de densidad como un flujo gravitacional de un líquido o un gas a través, bajo o sobre un fluido de densidad aproximadamente igual (Ford & Johnson 1983). En los embalses, las corrientes de densidad son causadas por diferencias debido a la temperatura, los sólidos totales disueltos (STD) y los sólidos suspendidos (SS). Sin embargo, las diferencias de densidad son principalmente causadas por diferencias de temperatura (Ford & Johnson 1983).

Cuando la densidad del tributario es menor que la densidad de la superficie del agua, el afluente podría flotar sobre la superficie (Ford & Johnson 1983), en inglés se conoce como overflow. Este flujo superficial puede ser mezclado por viento o por procesos de calentamiento y enfriamiento. Si la densidad del tributario es mayor a la densidad de la superficie del agua, el afluente empujaría el agua del embalse hasta que se igualan las fuerzas inerciales y dominan las fuerzas de boyancia, momento en el que el afluente se sumerge bajo la superficie, lugar llamado punto de sumergencia o plunge point. Después de esto, la corriente viaja como flujo de fondo, conocido en inglés como underflow. La velocidad y espesor de la corriente de fondo son determinados por un balance de flujo entre las fuerzas cortantes y la aceleración de la gravedad. Cambios en la densidad de la corriente de fondo pueden causar que ésta viaje como una corriente intermedia o intrusiva. La intrusión ocurre cuando la corriente de densidad deja el fondo y se propaga horizontalmente dentro del cuerpo de agua estratificado. La principal diferencia entre las corrientes intrusivas y las superficiales y de fondo es que la corriente intrusiva se mueve a través del embalse a una

elevación donde las densidades de la corriente y del agua del embalse son iguales (Ford & Johnson 1983).

La mezcla inicial y el atrapamiento, en inglés *entrainment*, son dos tipos de fenómenos de mezcla importantes cuando se analizan las corrientes de densidad. La mezcla inicial incluye todos los efectos de los procesos de mezcla que actúan en la vecindad del punto de sumergencia. Por su parte, el atrapamiento ocurre en la interface entre la corriente de fondo y el agua del embalse posterior al hundimiento de la pluma. La turbulencia generada por la rugosidad del fondo arrastra agua del embalse dentro de la pluma (Ford & Johnson 1983). En el trópico, la convección debida al enfriamiento nocturno y las corrientes de densidad debidas al enfriamiento diferencial y los ríos afluentes pueden ser los procesos más importantes para la advección y renovación de aguas profundas (Peeters & Kipfer 2009).

Al igual que las entradas de agua, las salidas también contribuyen a la mezcla a través de las corrientes que inducen. La magnitud y localización de estas corrientes controlan no solo la calidad de las descargas sino también la calidad dentro del embalse (Martin & McCutcheon 1999). Además, tienen injerencia en el tiempo de permanencia del agua en el embalse. Como indican Imberger y Patterson (1990), en el proceso de extracción selectiva se inhibe el movimiento vertical de la columna de agua y se impide la mezcla a gran escala, pero se permite el flujo horizontal (Anohin et al. 2006). En general, la extracción de agua se hace por un orificio ubicado en la presa al final de los embalses, a una distancia determinada del fondo. La posición de la captación, la estratificación del cuerpo de agua y el caudal evacuado determinarán la zona de extracción y el tipo de agua que saldrá del embalse. Con base en esto y con el fin de controlar la calidad del agua de los embalses, reducir los efectos adversos que la temperatura y otros constituyentes del agua tienen sobre su uso aguas abajo, se construyeron presas con orificios a diferentes profundidades (Cassidy 1989) en (Martin & McCutcheon 1999).

Los primeros en estudiar el proceso de extracción selectiva fueron Yih (1958) y Deblor (1959) en (Clarke & Imberger 1996). Ambos, para fluidos linealmente estratificados. En la

extracción selectiva constante de un fluido linealmente estratificado se aplica un balance de fuerzas a través de una línea de descarga que depende de la distancia a la captación. La región cercana a la captación tiene un flujo potencial (Clarke & Imberger 1996). Este flujo potencial se establece inmediatamente después de iniciar la turbinación, en él, la velocidad horizontal decrece linealmente hacia cero con la distancia a la captación. Este flujo está progresivamente modificado por difusión de vorticidad y de masa y por la convección inducida por ondas internas (Imberger et al. 1976). Aguas arriba de la captación la extracción selectiva forma una capa de ancho constante, donde el balance es principalmente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas boyantes. Si aguas arriba de la captación los efectos difusivos son importantes, el espesor de la capa de extracción se incrementa. El interés es entonces el balance entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de boyancia, y particularmente, la evolución del flujo atraído hacia la presa (Clarke & Imberger 1996).

En los embalses con estratificación térmica, se presenta un gradiente débil en el hipolimnio a la altura de la captación, menos pronunciado que el gradiente de la termoclina. Si se extrae poca agua, el gradiente de densidad vertical puede producir una fuerza boyante suficientemente fuerte para inhibir movimientos verticales, de tal forma que el agua captada viene de una capa delgada horizontal al nivel de la captación. Para grandes descargas las capas extraídas atraviesan la termoclina, y para descargas más fuertes, los efectos de la boyancia pueden ser completamente sobrepasados y el flujo retornar a un flujo potencial (Fischer et al. 1979).

Según Kennedy (1999), la extracción superficial genera disipación de calor porque la capa de agua más caliente es removida, resultando en la preservación de agua más fría y densa del hipolimnio. En contraste, la extracción más profunda tiende a almacenar calor porque la descarga de agua fría del hipolimnio resulta en una expansión de la capa del epilimnio calentada por la radiación solar (Casamitjana et al. 2003). Effler et al (1986) indican que descargar agua del hipolimnio, efectivamente hace que el agua esté más caliente en la zona

profunda. Esto puede tener implicaciones en la estabilidad de la columna de agua, lo que podría promover el arrastre vertical de nutrientes al epilimnio (Casamitjana et al. 2003).

En general existen muchos métodos y relaciones que con base en la posición de la captación, el caudal turbinado y algunas otras características del fluido y de la forma del cuerpo de agua permiten calcular el espesor de la capa de extracción en un punto dado. Para conocer estos métodos y teorías el lector puede remitirse a las siguientes referencias encerradas entre paréntesis (Rueda et al. 2005).

Para tener en cuenta todos los procesos físicos que acompañan el movimiento y las variaciones de temperatura se debe pensar en muchas dimensiones, tiempo y espacio, y en muchas variables o forzantes externos, por lo que la implementación de modelos numéricos es importante y determinante para la simulación de estos fenómenos naturales complejos.

2.3 Modelos numéricos

La solución de las ecuaciones que gobiernan un proceso, físico en nuestro caso, se hace, dada su complejidad, mediante la aplicación de técnicas de cálculo numérico.

Los primeros pasos para modelar la estructura interna de los embalses estuvieron dirigidos a predecir la temperatura de los efluentes. Raphael (1962) describe un método dividiendo un embalse en franjas horizontales; su aproximación formó las bases para los programas numéricos desarrollados por Water Resources Engineers, Inc., en los 60' y los métodos numéricos descritos por Markovsky y Harleman (1971). Los modelos numéricos de este tipo han sido usados ampliamente y dan adecuadas predicciones de la temperatura efluente (Fischer et al. 1979).

Los modelos numéricos pueden ser unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D). Cuando se incrementa dimensionalmente el modelo y la complejidad, se reduce la escala de tiempo sobre la cual el cuerpo de agua puede ser modelado. Los modelos 1D pueden ser aplicados para décadas, los 2D para varios años o décadas y los 3D para días, semanas o meses (Hodges 2009). Los modelos 1D promedian en planos

horizontales, lo que permite obtener la estratificación vertical. Los modelos 2D promedian lateralmente el cuerpo de agua, con ellos se logra representar tanto estratificación vertical como gradientes horizontales longitudinalmente. Los modelos 3D pueden ser discretizados en todas las direcciones.

Hay tres métodos básicos para discretizar las ecuaciones que gobiernan en la malla de un modelo: las diferencias finitas, los volúmenes finitos y los elementos finitos. El modelo numérico utilizado en este trabajo es el ELCOM desarrollado por el centro de estudios del agua (CWR) de la Universidad del Occidente de Australia. El modelo utiliza el método de las diferencias finitas para resolver las ecuaciones de Navier Stokes para flujo no permanente, viscoso e incompresible, usando la aproximación hidrostática para la presión (Villegas 2004). Para obtener más información del modelo y su aplicación, el lector puede remitirse al manual científico del ELCOM (Hodges & Dallimore 2006), al manual de usuario del ELCOM (Hodges & Dallimore 2007) o a Villegas (Villegas 2004), donde se explica claramente el funcionamiento del modelo.

3. Área de estudio

El embalse Porce II está 75 grados al oeste del meridiano de Greenwich y 6 grados al norte de la línea ecuatorial, siendo esta última característica la que lo hace tropical. Se encuentra sobre el costado occidental de la cordillera central de Los Andes colombianos, en el departamento de Antioquia (Figura 3-1). Las montañas que limitan con el perímetro norte del embalse, que llamaremos las montañas del norte, alcanzan en la parte final del embalse, hacia la presa, los 2.000 m.s.n.m. Las montañas del norte, hacia el oriente, llegan a 1.300 m.s.n.m. Las montañas del sur alcanzan los 1.700 m.s.n.m, también en la parte cercana a la presa. El área del espejo de agua del embalse llega a ser de aproximadamente 10 km² y el volumen máximo del embalse alcanza los 231 Hm³. Porce II es un embalse para generación de energía con capacidad efectiva de 405 MW.

Su principal afluente nace en el alto de San Miguel, aproximadamente a 2.700 m.s.n.m. desde donde se conoce como río Medellín, dado que atraviesa el municipio de Medellín, capital del departamento de Antioquia, además de otros 9 municipios del valle de Aburrá. Su viaje hasta el embalse Porce II es de aproximadamente 136 kilómetros, pero alrededor de 70 kilómetros antes de llegar al embalse, posterior a la descarga de sala de máquinas de la central Tasajera y la confluencia con el río Riogrande en Puente Gabino cambia de nombre para llamarse río Porce.

En este camino el río recibe parte de las descargas de aguas residuales de aproximadamente 3,3 millones de personas que habitan el valle de Aburrá¹, hecho que se refleja en la presencia

¹ Anuario estadístico de Antioquia. 2009.

abundante de algas y macrófitas acuáticas en el embalse. El río también llega al embalse con alta carga de sólidos suspendidos lo que se debe a las características morfológicas de su cuenca, en la cual participan gran cantidad de riachuelos o quebradas que aportan generosas cantidades de sólidos, principalmente arenas y arcillas². Al igual que la carga de nutrientes, la concentración de sólidos también se manifiesta en el embalse, principalmente en las alteraciones de la morfología, formando y moviendo islotes³.

El área del embalse se encuentra bajo un régimen de lluvias bimodal, siendo octubre el mes más lluvioso, con una precipitación promedio interanual de 293 mm y otro seco que se extiende de noviembre a marzo (Ingeniería de presas, EPM 2008). Su temperatura promedio es de 22,5 °C y su humedad relativa promedio es del 81%.

El río Porce lleva en promedio anual 115 m³/s, lo que representa cerca del 99% del caudal que llega al embalse. Dentro de las corrientes poco representativas en términos de caudal están, la quebrada Guaduas y la quebrada La Cancana que forman dos brazos del embalse. Por las montañas del norte las más reconocidas son las quebradas el Algarrobo y La Frijolera, ésta última con alta capacidad portante y características de corriente torrencial⁴. De las montañas del sur sobresalen las quebradas Granada y El Huevo.

El embalse se divide en varias zonas con características diferenciadas. La zona de entrada del río Porce (ZP) por el sur del embalse es de aproximadamente 2 km de longitud, en sentido norte, con velocidad de flujo relativamente alta, turbiedad cercana a 300 UNT, tiene una profundidad máxima de 12 metros y un ancho que varía entre 150 y 550 metros. La segunda zona de aproximadamente 3 kilómetros de longitud, 300 metros de ancho y 8,8 metros de profundidad media que se conoce como Guaduas (ZG), dado que es un brazo del embalse que inundó parte de la cuenca de la quebrada Guaduas. Esta zona cobra

² Observaciones de campo

³ Observaciones de campo

⁴ Observaciones de campo

importancia, al igual que la del brazo de la quebrada La Cancana por la presencia notable de macrófitas acuáticas.

La entrada del río Porce, el brazo de la quebrada Guaduas y hasta la confluencia con el brazo de la quebrada La Cancana conforman la primera región. Hasta este punto la superficie inundada tiene cerca de 3,0 km². La zona tres es también una cuenca inundada con sentido oriente-occidente y conforma la segunda región (ZC). La quebrada que formó dicha cuenca es la quebrada La Cancana. El área es de 1,5 km², tiene una profundidad media de 12 metros y su ancho varía entre 100 y 800 metros.

Del lugar donde confluyen las dos primeras regiones inicia la tercera región, sector donde el sentido del flujo principal cambia 90 grados hacia el occidente. Esta región, la más importante del embalse, se conocerá como cuerpo principal. Está conformada por una primera zona de transición, llamada zona alta (ZA), de aproximadamente 2 km de longitud, de profundidad media de 40 metros y de ancho puede llegar a 800 metros.

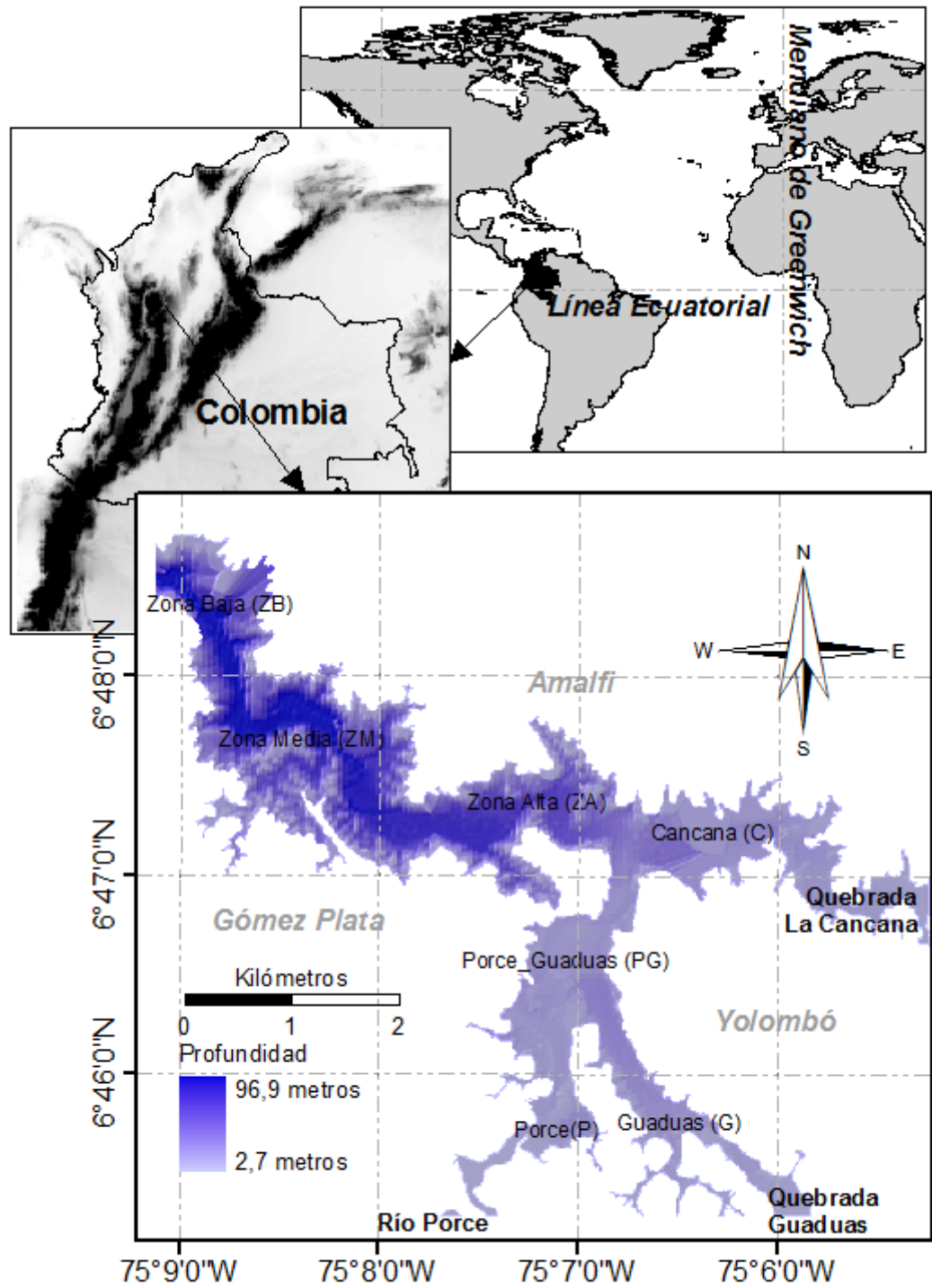


Figura 3-1: ubicación del embalse Porce II

En esta zona se reduce la velocidad del flujo, se presenta alta sedimentación y es hasta allí donde hay mayor presencia de macrófitas acuáticas. La segunda zona, la más profunda del embalse, tiene aproximadamente 4,2 kilómetros de longitud, puede alcanzar en su parte más amplia 2 km de ancho, en la zona media (ZM), y en su parte más profunda, llamada zona baja (ZB), una profundidad de hasta 96 metros cerca de la presa.

- Estructura de la presa

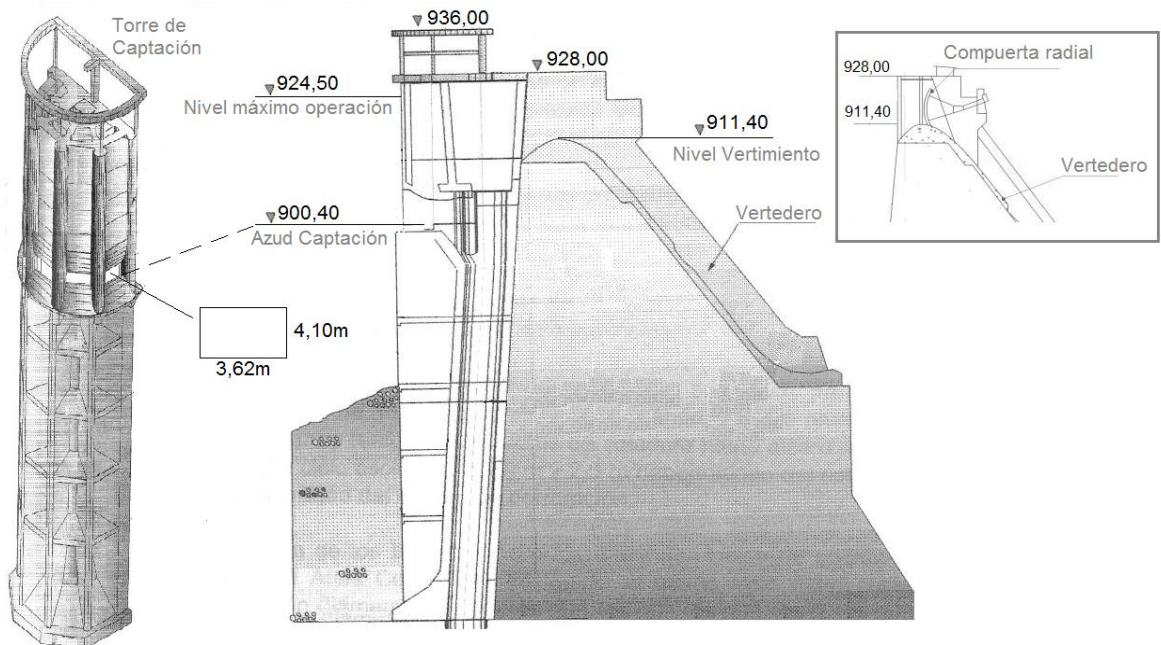


Figura 3-2: estructuras de la presa. Modificado de Ingeniería de Presas. EPM 2008.

En la Figura 3-2 se muestran las cotas más relevantes, como la altura de la captación, el azud de captación, a 900,4 m.s.n.m y el nivel de vertimiento que es a los 911,4 m.s.n.m. En el recuadro de la esquina superior derecha se muestra una compuerta radial. El vertedero del embalse Porce II es controlado con cuatro compuertas radiales (Ingeniería de Presas, 2008).

4. Datos y metodología

Esta es la estrategia desarrollada para entender el comportamiento de la estructura térmica y algunos procesos de transporte en el embalse Porce II. Primero se presenta la información secundaria, de la cual depende la preparación, el desarrollo y el éxito en las campañas de campo. Luego la información primaria, que es precisamente aquella obtenida en el trabajo de campo. La metodología utilizada para la simulación numérica, la principal herramienta computacional usada en el entendimiento del sistema, se presenta en el capítulo Simulación numérica.

4.1 Información secundaria

Es información suministrada por EPM. Se contó con información topográfica, metereológica, de la estructura de la presa y de la operación del embalse. También se tuvo acompañamiento en algunas ocasiones de funcionarios de EPM y personas que laboran en el embalse quienes aportaron su conocimiento de la zona.

4.1.1 Topografía y batimetría

Se dispuso de curvas de nivel cada 50 metros y de dos batimetrías que se hicieron, una en 2004 y otra en 2006. Durante el levantamiento batimétrico de 2006 no se accedió a algunas zonas por presencia de macrófitas, por lo que la batimetría no está completa⁵. Estas zonas se completaron con batimetría de 2004. De las curvas de nivel se analizó el entorno del cuerpo

⁵ Información suministrada por funcionarios de EPM

de agua. Éste es importante porque es quien dirige, como se presentará más adelante, el campo de viento en el embalse. De la batimetría de 2006-2004 se obtuvieron generalidades del embalse como pendiente en las laderas, área y volumen asociados a cada cota y además se generaron las mallas de cálculo que sirvieron para el análisis de sensibilidad del modelo. La topografía y la batimetría fueron importantes para la planeación de las campañas de campo en las cuales era relevante conocer las zonas más profundas del embalse, generalmente asociadas al talweg de los principales afluentes.

La batimetría fue contrastada con las profundidades registradas con el perfilador SBE 25 Sealogger CTD (CTD)⁶ en las zonas aguas arriba de la estación PE08 (más adelante se indica la posición de esta estación) con el fin de evidenciar procesos de sedimentación o socavación. En el parte de simulación numérica se presenta la incidencia de no tener una batimetría actualizada en los resultados del modelo.

4.1.2 Clima e hidrología

Se trabajó con el caudal del río Porce medido en la estación limnigráfica El Diamante localizada 9 km aguas arriba de la entrada al embalse, y con registros de magnitud y dirección del viento, radiación de onda corta (ROC), humedad relativa (HR), temperatura ambiente y precipitación de la estación climatológica El Mango, propiedad de EPM y que está ubicada sobre la presa, en el extremo occidental del embalse. Se dispuso además de información de viento de una estación climatológica puesta sobre la superficie de agua y otra estación climatológica puesta en la Isla. Primero se separó la información de viento por direcciones y posteriormente en rangos de velocidad durante períodos que incluyeron por lo menos una semana anterior a cada muestreo. La información de viento se comparó con la

⁶ Versión 003

registrada en El Mango y se establecieron correlaciones a fin de entender el movimiento del aire en el embalse y su efecto sobre la superficie del agua.

- Caudales

En estudios de estructura térmica de cuerpos de agua lénticos tener una buena aproximación del caudal y de la temperatura del principal afluente, en este caso el río Porce, es determinante al momento del análisis de la información de campo y en la aplicación del modelo numérico. Conocer cómo es su comportamiento puede dar respuesta a variaciones del tiempo de permanencia del agua en algunas zonas, del nivel del embalse, de cambios en la turbidez, la temperatura, la conductividad, el oxígeno disuelto y otras variables fisicoquímicas y biológicas.

En los perfiles se buscó evidencia del tipo de corriente de densidad, observando los valores de turbidez y conductividad y asociándolos a los valores registrados en la zona ZP, cercana a la entrada del río Porce. Por la ubicación de la estación limnográfica El Diamante y dado que no hay afluentes importantes al río antes de su llegada al embalse, es de esperar que a su arribo el caudal sea solo un poco mayor, pero que la forma de la hidrógrafa sea igual. Por esta razón, y dado que en las simulaciones preliminares el nivel del embalse simulado era diferente al nivel del embalse medido, durante la calibración del modelo se hicieron varios ejercicios numéricos modificando los caudales de entrada y salida del embalse en diferentes porcentajes. Se decidió trabajar con un aumento del 5% del caudal suministrado (su justificación se hace en la parte de resultados de la calibración del modelo). El caudal de la quebrada Guaduas se asumió de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ constante para todos los meses de muestreo, y el caudal de la quebrada La Cancana de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para abril y de $3,8 \text{ m}^3/\text{s}$ para noviembre y diciembre de 2010. Considerando la poca información, la suministrada por las personas de la zona fue importante porque junto con un aforo realizado, brindaron una idea de los niveles cotidianos y los caudales medios y máximos de las quebradas. En la Figura 4-1 se observa la

ubicación de las cuencas de las quebradas Guaduas y La Cancana. A pesar de que se hizo la hidrología de estas quebradas con el software HydroSig 4.0⁷ con base en la estación climatológica El Mango, se decidió trabajar con los caudales medidos en noviembre de 2010, ya que los valores promedio calculados fueron muy inferiores.

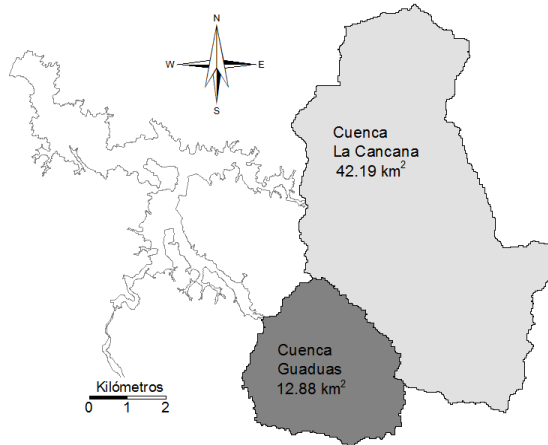


Figura 4-1: cuencas de las quebradas Guaduas y La Cancana

En la parte de simulación numérica se toca de nuevo el tema de los caudales afluentes, y se presenta el trabajo con los caudales efluentes.

- Magnitud y dirección del viento

En el embalse Porce II, se tiene una estación climatológica puesta sobre la presa desde la cual se registra, entre otras cosas la magnitud y la dirección del viento. Ésta información da una idea de cómo es el viento en las cercanías a la presa, pero no en las demás zonas. El arrastre que genera el viento sobre el agua depende de su magnitud y su variabilidad, y tiene incidencia tanto en la estructura térmica como en el tiempo de residencia del agua en el embalse. Rueda et al. (2005) reportan cambios en el tiempo de residencia de hasta el 60% al implementar un campo de viento variable. Ramos (2007), quien simuló el embalse Porce

⁷ Software desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos hidráulicos. Versión preliminar 2011.

II implementando un campo de viento variable cita diferentes autores, como Józsa (1990) y Sarkkula (1991) quienes igualmente señalan la necesidad de considerar la variación espacial de los esfuerzos producidos por el viento sobre la superficie del cuerpo de agua.

Atendiendo a la experiencia y recomendaciones encontradas en la literatura y a lo encontrado en las campañas de campo, se implementó un campo de viento variable en el tiempo y en el espacio. La hipótesis para el viento en el embalse Porce II fue que éste se acopla a la orografía del embalse, como ya lo sugirió Ramos (2007) (Ramos 2007). Lo nuevo es que se cree que cuándo el viento haciende por el cañón también lo hace por el brazo La Cancana, por el brazo Guaduas y que sube por el cañón del río Porce. Igualmente, cuando baja por el cañón, lo hace por los brazos. Se comparó la información de la estación El Mango con la información de una estación flotante puesta en dos lugares diferentes del embalse. En 2008 se localizó aproximadamente a 1000 metros de la presa, y se compararon cinco meses de datos entre mayo y septiembre. La estación se conocerá como Flotante-Presa⁸. Luego la estación flotante se instaló en la isla, recolectándose información desde el 17 de noviembre hasta el 3 de diciembre de 2010. La estación se conocerá como Flotante-Isla. Ambas estaciones ubicadas en el cuerpo principal del embalse, donde se esperan las mayores magnitudes de viento. La comparación entre la estación El Mango y las estaciones Flotantes tiene varios objetivos: primero conocer si el viento se acopla a la orografía del embalse, de lo cual se obtendría una aproximación a la dirección del viento en las diferentes zonas del cuerpo de agua. Segundo entender cómo varía espacialmente la magnitud del viento de acuerdo a la dirección que lleva, y tercero, poder generar un campo de viento variable a partir de una única estación climatológica, en este caso, la estación El Mango. Este último objetivo es relevante porque en los estudios de este tipo generalmente se cuenta solo con una estación climatológica midiendo continuamente.

⁸ Información suministrada por Winston Cuellar, funcionario de EPM

Posterior a esto se aplicó una metodología de interpolación bi-armónica presentada por Sandwell (1987) y se generó el campo de viento variable. Para implementar el campo de viento variable se debe trabajar con estaciones virtuales de viento, que son las estaciones entre las cuales se hace la interpolación. Se llaman virtuales porque contienen las mismas variables de una estación de viento normal, pero sus valores no son medidos, son calculados o supuestos. A cada estación virtual se relacionó dos ángulos que serían hacia los cuales viajaría el viento y que están asociados a las direcciones predominantes del viento en el embalse, a diferencia de lo que hizo Ramos (Ramos 2007), quien asoció a cada estación virtual un factor que modificaría su dirección.

Se asocia entonces un ángulo para cuando el viento registrado en presa asciende por el cañón, y otro para cuando el viento desciende por el cañón. Los ángulos asociados a cada estación se obtuvieron observando la topografía. En cuanto a la magnitud del viento asociada a cada estación virtual se asignaron factores de viento con base en el análisis que se presentará en el capítulo Resultados y análisis, que contempla tanto la relación entre las magnitudes de viento de las estaciones comparadas como la posición de la estación virtual, siendo este un proceso dinámico, en el que se tiene en cuenta tanto la dirección desde donde proviene el viento como su magnitud. En total se distribuyeron 51 estaciones virtuales en el área de influencia del embalse. Finalmente, durante las simulaciones se buscó representar el efecto de las macrófitas en la acción del viento, reduciendo su magnitud en las zonas de mayor presencia de plantas acuáticas.

- Operación del embalse

La información relacionada con la operación del embalse incluye los caudales turbinados y vertidos y nivel del embalse. La operación del embalse, al igual que el caudal de entrada, afecta su dinámica térmica. La diferencia es que ésta obedece principalmente a consideraciones humanas, mientras que el otro a condiciones ambientales. De la misma manera como el caudal afluente puede dar respuesta a la estructura fisicoquímica de la columna de agua, el caudal evacuado también lo puede hacer. Ésta es una de las razones

por las que se analizó el caudal turbinado y el vertido. La otra razón, que se indicó previamente, es que durante las simulaciones preliminares, los niveles medidos dieron diferente a los niveles simulados, situación que evidenció la necesidad de analizar más profundamente las series de caudales de entrada y de salida.

En Porce II los caudales turbinados se miden de dos maneras: de forma directa mediante un limnógrafo puesto al final del túnel de descarga y de forma indirecta, mediante una ecuación que transforma los vatios de potencia generada a metros cúbicos de agua por segundo. El caudal turbinado debió ser ajustado durante la calibración del modelo, incrementándose el valor reportado por las mediciones en 12% cuando éste está entre 160 y 200 m³/s. En cuanto al caudal vertido, se trabajó con volúmenes diarios que fueron convertidos a caudal. Igualmente esta información no es precisa y fue modificada con base en los ajustes previos de caudal de entrada y turbinado y los niveles medidos (su justificación se hace en la parte de resultados de la calibración del modelo). No se contó con información diaria de apertura o cierre de compuertas deslizantes para vertimiento, aunque la información se solicitó.

- Otras variables

La radiación de onda corta, la temperatura ambiente, la precipitación y la humedad relativa también hacen parte de la información registrada en la estación climatológica El Mango. Con base en el análisis de estas variables, incluyendo los caudales de entrada y salida, el nivel del embalse y el comportamiento del viento, se hizo una comparación global entre las campañas. Junto con el análisis de estas variables se buscó entender las características de los perfiles de temperatura medidos en campo. Las variables fueron revisadas y preparadas minuciosamente para utilizarlas en ELCOM.

4.2 Información primaria

Se hicieron tres campañas de campo en 2010, cada una de cinco días consecutivos cubriendo un período entre las 8:00 y las 16:30. En total se midieron 216 perfiles de temperatura, turbidez y conductividad. Durante la primera campaña de campo se hicieron 107 perfiles, en

la segunda 30 y en la tercera 79 perfiles. La primera campaña se realizó entre el 12 y el 16 de abril, la segunda entre el 12 y el 16 de julio y la tercera desde el 29 de noviembre hasta el 3 de diciembre, única campaña en la que se instaló un sensor de temperatura en el río Porce y una estación climatológica en la isla. Se midió la temperatura de los afluentes, nubosidad, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, profundidad de disco Secchi y presencia o ausencia de macrófitas.

4.2.1 Desarrollo del trabajo de campo

Lo ideal para el desarrollo de una campaña de campo, su posterior análisis y el trabajo de simulación numérica es contar con registros continuos de los principales forzantes externos. Cuando no se cuenta con esta información permanente de la zona de estudio, se busca que mínimo el registro abarque una semana antes del comienzo del muestreo. Esta información es empleada al inicio de las simulaciones y se espera que abarque el tiempo de calentamiento del modelo, así, cuando se llegue a los días con los que se calibrará o se validará, es decir, los días de campaña, el modelo ya haya superado el tiempo de calentamiento.

EPM suministró información climatológica permanente de la estación El Mango y los registros de caudal del río Porce de la estación El Diamante. La temperatura de los afluentes se midió mínimo una vez por campaña con sonda multiparamétrica⁹. Únicamente en la tercera campaña de campo se pudo instalar un sensor de temperatura en el río Porce, cerca de la estación El Diamante, y una estación climatológica adicional en el cuerpo principal, en la isla, llamada Flotante-Isla, 13 días antes de la campaña. Con las mediciones de temperatura de los afluentes se buscó tener idea de las variaciones diurnas del ciclo de temperatura. Por las condiciones del muestreo no fue posible tener mediciones continuas o más seguidas durante todas las campañas de campo. Es importante recordar que el caudal y

⁹ Hydrolab MS5

la temperatura del afluente determinan, en relación con la temperatura del cuerpo de agua al que llega, qué tipo de pluma se presentará, por esto es importante tener los registros de estas variables. Además, porque es de esperar que un mejor registro de ellas tenga como resultado una mejor representación por parte del modelo de las condiciones del embalse.

Posterior al trabajo previo de instalación de equipos sigue la medición en el embalse. Se consideraron 12 estaciones estáticas (Figura 4-2), es decir, puntos de medición con coordenadas geográficas que fueron establecidas al inicio del proyecto. Estas estaciones se recorrieron mínimo una vez por campaña, sus coordenadas se muestran en la Tabla 4-1. Las estaciones están localizadas en las cercanías de los principales afluentes y en las confluencias de los brazos. También se distribuyen en el cuerpo principal del embalse, en zonas ribereñas y pelágicas, algunas que se presumía que fueran más quietas y otras estaciones en puntos cercanos al talweg, de mayor profundidad. Con las estaciones cercanas a los afluentes se esperaba conocer las características fisicoquímicas de las aguas que llenan el embalse, con las demás estaciones se buscaba entender de manera general la variación espacio temporal de la estructura térmica del embalse.

Tabla 4-1: coordenadas geográficas de las estaciones estáticas.

Estación	Latitud (N)	Longitud (W)
PE01	75°07'8.772"	6°45'26.954"
PE02	75°06'58.996"	6°46'02.736"
PE03	75°06'54.175"	6°45'20.166"
PE04	75°06'37.673"	6°46'04.155"
PE05	75°05'29.081"	6°46'41.658"
PE06	75°06'14.11"	6°47'00.501"
PE07	75°06'39.297"	6°47'05.165"
PE08	75°07'40.008"	6°47'04.214"
PE09	75°08'24.924"	6°47'12.631"
PE10	75°07'45.595"	6°47'36.073"
PE11	75°08'29.282"	6°47'47.871"
PE12	75°08'54.732"	6°48'21.655"

También se midieron perfiles en otras estaciones en el embalse, a las cuales se les llamó estaciones dinámicas (Figura 4-2). Con estos perfiles se pretendió entender procesos físicos con un grado más avanzado de detalle. Por ejemplo, se buscó conocer cómo avanza la pluma

del río Porce, si ésta entra en los brazos La Cancana y Guaduas, por dónde lo hace y hasta donde llega, y cómo es su avance en el cuerpo principal. Este grado de detalle se buscó haciendo perfiles con poco tiempo de diferencia entre ellos sobre líneas imaginarias transversales y longitudinales al embalse. El recorrido que se hace por las líneas imaginarias se llamó transecto. Los transectos transversales son aquellos recorridos cuya línea imaginaria es transversal al que se espera sea el flujo principal, los transectos longitudinales son aquellos cuya línea imaginaria se espera tenga el mismo sentido del flujo principal. Como se presentará más adelante, se hicieron transectos transversales en el brazo Guaduas, en el brazo La Cancana y en diferentes partes del cuerpo principal. También transectos longitudinales desde la entrada del río Porce hasta la presa, transectos longitudinales por el brazo Guaduas y por el brazo la Cancana. Los perfiles se midieron con CTD y algunos perfiles se tomaron con sonda multiparamétrica. El CTD puede tomar 8 datos por segundo de conductividad, turbidez, temperatura y presión hidrostática mientras baja en la columna de agua y ofrece la posibilidad de ver en tiempo real la información. La posibilidad de observar instantáneamente los diferentes perfiles sirvió para orientar el trabajo en campo. El tiempo promedio de medición en cada estación fue de 10 minutos. Durante este tiempo se hace el perfil, que tarda cerca de un minuto y se miden las variables que se listan a continuación y que se utilizaron como apoyo para explicar la distribución de la temperatura en la columna de agua. Se mide la magnitud del viento con anemómetro manual¹⁰ y la dirección del viento con brújula. Estos valores se comparan con los registrados en El Mango y con la alineación del embalse, con el fin de corroborar o desvirtuar los patrones de flujo ya encontrados mediante la comparación entre las estaciones El Mango y Flotantes. La transparencia Secchi se midió con disco Secchi y se promedió por zonas, se aplicaron las ecuaciones presentadas en el marco teórico y se obtuvo un rango de valores del coeficiente de extinción zonificado en el embalse. Al momento de analizar los perfiles, tanto el campo

¹⁰ Extech. Mini Thermo-Anemometer. Modelo 45118.

de viento como la profundidad Secchi se asociaron principalmente a los procesos superficiales. De nubosidad, parámetro que se determina visualmente y que incide en la radiación de onda corta, se tiene datos únicamente durante los días de muestreo. La temperatura ambiente y la presencia o ausencia de macrófitas acuáticas también se registraron. La presencia de macrófitas se asoció a reducción de la penetración de la luz y del efecto directo del viento sobre la superficie del agua. La metodología de aplicación de estas variables está explicada en el capítulo Simulación numérica.

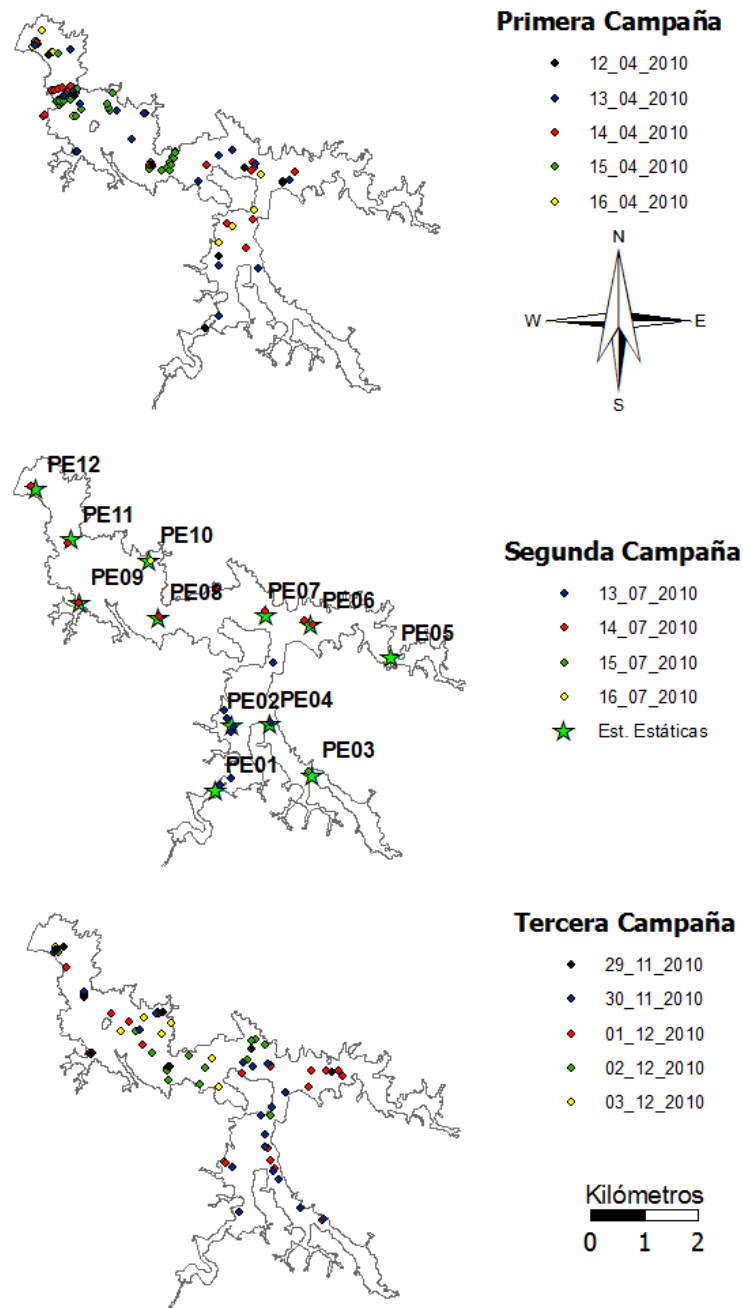


Figura 4-2: estaciones estáticas y puntos monitoreados durante las tres campañas de campo.

4.3 Simulación numérica

La simulación numérica se hizo con el modelo matemático ELCOM. Con base en la batimetría de 2006-2004 se generaron varias mallas de cálculo. Luego se evaluó el coeficiente

de estabilidad de Courant-Friederich-Lewis (CFL) y el tiempo de duración de cada simulación para cada malla y paso de tiempo apropiado. Se eligió trabajar con una malla de 75x75 metros y un paso de tiempo de 45 segundos. De la mano con la sensibilidad a parámetros físicos se calibró el modelo con datos de la primera campaña. El parámetro del modelo calibrado directamente fue el coeficiente de extinción de la luz. No se observaron cambios en la estructura térmica con modificaciones a este parámetro. La simulación cubrió todo abril de 2010. La validación del modelo se hizo con información de la tercera campaña y va desde el 17 de noviembre hasta el 3 de diciembre de 2010. Durante el proceso de calibración y de validación, aunque los resultados son prometedores, se evidenció la falta de información precisa y actualizada principalmente de la temperatura de entrada del río Porce y de la batimetría.

4.3.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad a los parámetros numéricos, tamaños de malla e intervalos de cálculo, principalmente, se hizo al inicio del proyecto. La sensibilidad a los parámetros físicos se hizo en la etapa de calibración del modelo.

- Parámetros numéricos

Con la batimetría de los años 2006 y 2004 se generaron cuatro mallas horizontales uniformes de 150x150, 100x100, 75x75 y 50x50 metros con el software ArcGis. Se hicieron tres simulaciones por cada malla para pasos de tiempo de 30, 45 y 60 segundos. Las simulaciones funcionaron bajo iguales condiciones físicas, es decir, los caudales y temperatura de entrada y salida, las variables climáticas y las condiciones iniciales fueron las mismas. Se evaluó el mismo número de perfiles para cada malla y se hicieron los respectivos análisis que implican el cálculo de parámetros estadísticos como el error cuadrático medio (ECM) y el coeficiente de variación (CV). Los resultados del ECM y del CV no se incluyen porque las diferencias fueron pequeñas y no sustentaron la favorabilidad de utilizar una malla u otra. La condición de CFL fue superada positivamente para todas las mallas de cálculo en los pasos de tiempo

evaluados, excepto para la malla de 50x50 metros que requiere un paso de tiempo (Δt) igual o inferior a 30 segundos.

El cuerpo de agua en estudio tiene su origen en el estancamiento de un río caudaloso, encañonado, con valores hasta del 70% de pendiente en las laderas y de pendiente a través del talweg de aproximadamente el 1%. Esto invita a la utilización de una malla de alta resolución vertical y horizontal que permita capturar de mejor manera la morfometría del embalse. Como se mencionó anteriormente, los análisis estadísticos no fueron determinantes en la elección del tamaño de malla, para ello primó verificar la condición de CFL y el deseo de trabajar con una malla ligera en las simulaciones y lo más detallada posible. Estas premisas las cumplió la malla de 75 x 75 metros, que ofrece la posibilidad de utilizar un paso de tiempo de hasta 90 segundos sin consideraciones negativas en la estabilidad numérica del modelo. También es posible reducir el paso de tiempo hasta 30 segundos y obtener un tiempo total de simulación menor a 10 horas, considerado adecuado. Esta malla permite maniobrabilidad numérica, lo que se considera relevante dadas las condiciones de variabilidad del nivel del embalse y la necesidad de utilizar una malla vertical detallada, lo que tiene implicaciones en el tiempo computacional.

4.3.2 Calibración del modelo

El único parámetro del ELCOM que fue directamente calibrado es el coeficiente de extinción de la luz. Para el proceso de calibración se utilizó la información de la primera campaña, durante la cual no hubo vertimientos. Esta campaña se consideró adecuada para el proceso de calibración porque se contó con buena información de campo.

En primer lugar se corrió el modelo con la información tal cual fue entregada por EPM y obtenida durante las campañas de campo. Se analizaron los 12 puntos estáticos presentados en la Tabla 4-1 comparando lo simulado con lo medido en la campaña. Posteriormente se inició el proceso de manipulación de las condiciones de frontera, condiciones iniciales y forzantes externos. Primero se modificó la malla ajustando el dominio y cambiando las

profundidades en las estaciones estáticas donde fuera necesario. Luego se varió la temperatura inicial del embalse con base en los perfiles medidos y su ubicación. Se modificó también el caudal y la temperatura de los afluentes, el campo de viento, el coeficiente de extinción, el coeficiente de arrastre, la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la nubosidad.

- Caudales de entrada y salida

Lo primero que se identificó luego de las primeras simulaciones fue la diferencia entre el nivel medido en la estación El Mango y nivel simulado. Como se indicó, el caudal del río Porce se establece 9 kilómetros aguas arriba del embalse. Las quebradas afluentes que cuentan con más información de caudales son Guaduas y La Cancana, y de ellas no se tiene registro continuo y las mediciones son casi nulas. El caudal turbinado se calcula en función de la generación de energía eléctrica, valor suministrado por EPM para el proyecto, y de la lámina de agua medida al final del túnel de descarga. El vertimiento se entrega como volumen diario, no se dispone de series en que se indique algún valor de apertura de las compuertas radiales o del número de compuertas que se abren. El procedimiento seguido en el ajuste de los caudales puede ser explicado a partir de la Figura 4-3. En ella se presentan, en el panel superior información de una simulación con datos entregados por EPM sin ningún tipo de ajuste. En el panel inferior se grafica información de la simulación con datos modificados.

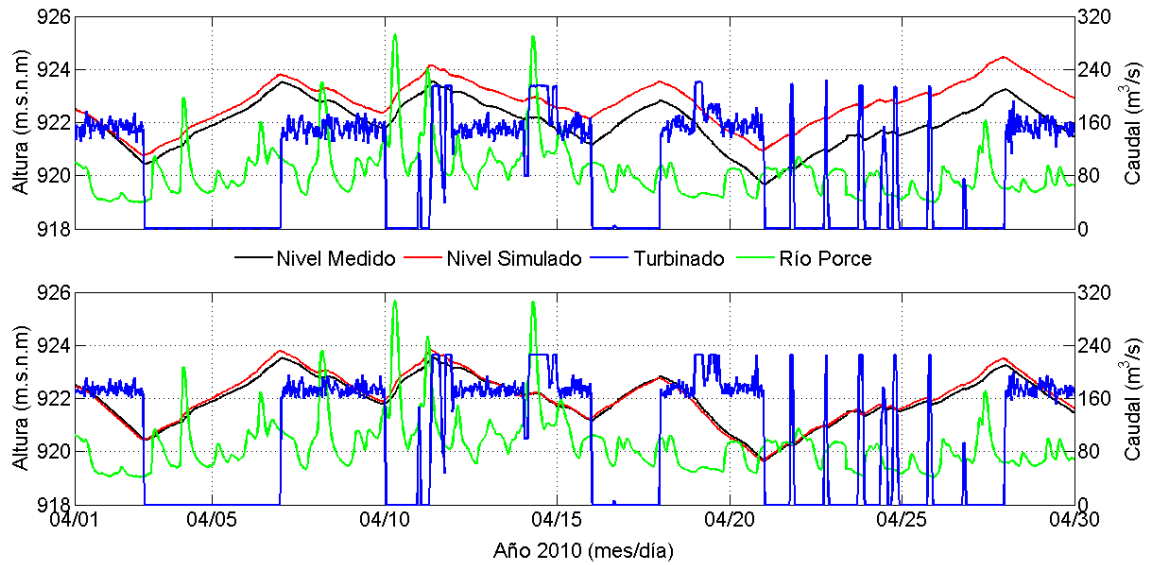


Figura 4-3: ajuste de caudales de entrada y salida al embalse.

Del panel superior se observa que el nivel simulado está por encima del nivel medido y que la diferencia entre ambos es cada vez mayor luego de presentarse un evento de turbinación. Se analizó la serie de caudal turbinado y se encontraron a grandes rasgos dos tipos de turbinación. Una oscilando cerca a $160 \text{ m}^3/\text{s}$ con desviación estándar entre 14 y $18 \text{ m}^3/\text{s}$, y otra cercana a los $220 \text{ m}^3/\text{s}$ con desviación estándar de aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Se decidió incrementar el caudal turbinado en 12% cuando éste fuera superior a 100 e inferior a $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Cuando fuera superior a $200 \text{ m}^3/\text{s}$ se llevó a $225 \text{ m}^3/\text{s}$.

El caudal del río Porce se incrementó en 5% dada la localización de la estación de medición. Se consideró poco práctico aplicar métodos de rendimiento ya que no se tiene información precisa que respalde el trabajo.

La quebrada Guaduas y la quebrada La Cancana son conocidas por el área inundada que aportan al embalse, pero su caudal, en comparación con el caudal del río Porce es muy pequeño, y en relación al balance de masa no fue relevante. Luego de los ajustes indicados se obtuvo el nivel (en rojo) que se presenta en el panel inferior de la Figura 4-3.

- Condiciones iniciales

Durante la calibración se modificaron las condiciones iniciales. En principio se simuló con una temperatura constante en el embalse. Posteriormente se introdujeron perfiles de temperatura en algunas zonas con el fin de reducir el tiempo de calentamiento del modelo y mejorar en los procesos que se dan en las zonas cercanas a las afluencias. Los perfiles de inicialización se eligieron con base en los medidos durante el primer día de muestreo. Según Martin y McCutcheon (Martin & McCutcheon 1999), las condiciones iniciales dependen de la longitud de la simulación en relación con el tiempo de retención y las condiciones de borde. Esta aseveración fue claramente identificada durante las simulaciones, en las que las condiciones iniciales permanecían casi intactas en algunas zonas del embalse, zonas identificadas como de mayor retención hidráulica.

- Temperatura de los afluentes

Este parámetro se midió pocas veces. Para determinar la temperatura de entrada del río Porce más adecuada en las simulaciones primero se hicieron ensayos buscando encontrar un ciclo diario de temperatura del río con base en las mediciones. Pero la información era poca y los resultados no fueron relevantes. Finalmente se escogió trabajar con la temperatura registrada en la estación PE01 el 13 de abril, de 23,45 °C. Este día tuvo el mayor número de perfiles distribuidos en el embalse e inicialmente se creyó que se podía comparar el efecto de la temperatura del río en más zonas. La simulación base se hizo entonces con una temperatura para el río Porce de 23,45 °C constante. Esta fue la temperatura con la que se obtuvieron los mejores resultados. En la Figura 4-4 se presentan algunos de los ejercicios que se hicieron variando la temperatura de entrada del río Porce. Se asumió la temperatura de la quebrada Guaduas como la registrada en la zona profunda del perfil medido en la estación PE03, de 23,3 °C y de la quebrada La Cancana igualmente la registrada en la zona profunda del perfil PE05, de 23 °C. En la estación PE05 parece ser claro que el agua de la quebrada La Cancana entra como una pluma de fondo (Figura 4-4). Esta hipótesis se evaluó durante algunas simulaciones en las que se varió la temperatura de entrada de la quebrada,

obteniéndose los mejores acercamientos con temperaturas tomadas de la zona profunda del perfil medido en PE05.

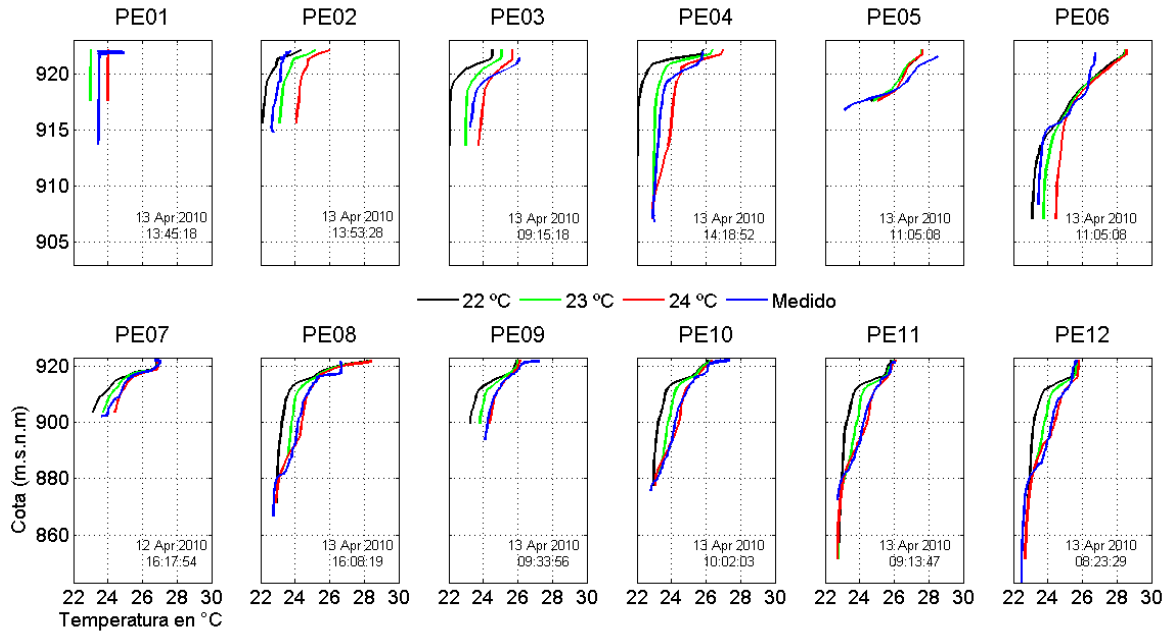


Figura 4-4: simulación variando la temperatura del río Porce.

- Campo de viento y macrófitas

Es importante recordar que la presencia de macrófitas en el embalse fue significativa, y que ésta afecta considerablemente el efecto del viento sobre la superficie del agua. En la Figura 4-5 se muestran una aproximación al cubrimiento de macrófitas durante las tres campañas de campo.

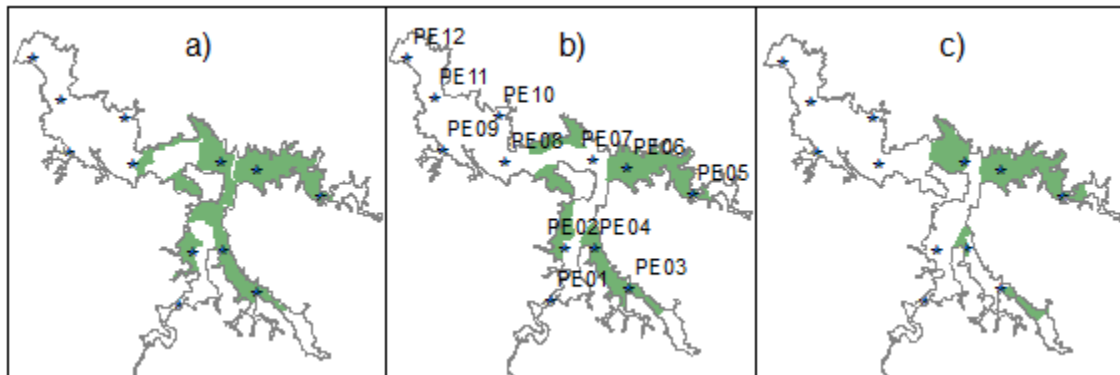


Figura 4-5: cubrimiento de macrófitas en el embalse durante a) la primera de campo, b) la segunda y c) la tercera campaña de campo.

En la Figura 4-6 se presenta un ejercicio en el que se variaron los factores de viento a la mitad, a un cuarto y al doble, dejando las demás variables a analizar constantes para todas las simulaciones. El resultado más evidente es que a menor viento mayor es la temperatura en la superficie del agua, pero hay otro resultado importante. En las estaciones PE03 y PE05, que para la primera campaña estaban cubiertas de macrófitas, los perfiles que mejor se ajustan son los que tienen menor magnitud del viento. Este fue uno de los pasos que se siguieron para simular el efecto de las macrófitas, que no está incluido en el balance térmico y tampoco en el balance hidrodinámico del modelo ELCOM. También se hicieron simulaciones en las que se modificaron la nubosidad, la radiación de onda corta, la humedad relativa y la temperatura ambiente en las zonas con presencia de buchón.

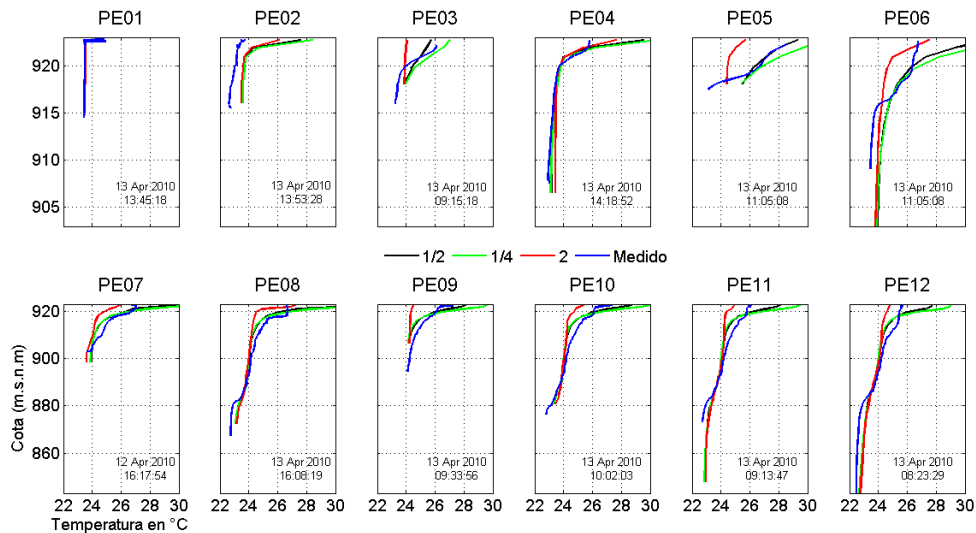


Figura 4-6: simulaciones variando la magnitud del viento

- Coeficiente de extinción de la luz

En la Figura 4-7 se comparan perfiles con varios coeficientes de extinción. Con este tipo de ejercicios se evaluaron los rangos del coeficiente de extinción que mejor se ajustarían a cada zona. Luego estos valores se contrastaron con los calculados con las diferentes ecuaciones que utilizan la profundidad Secchi y se escogió la ecuación que mejor se ajustaría al caso.

Esta ecuación sería la misma que se utilizaría para el proceso de validación del modelo. Con este método se estaría garantizando que las variaciones del coeficiente de extinción no obedecerían a una simple búsqueda de un mejor resultado en la validación, sino a la identificación de la ecuación que mejor representa la extinción de la luz en el embalse.

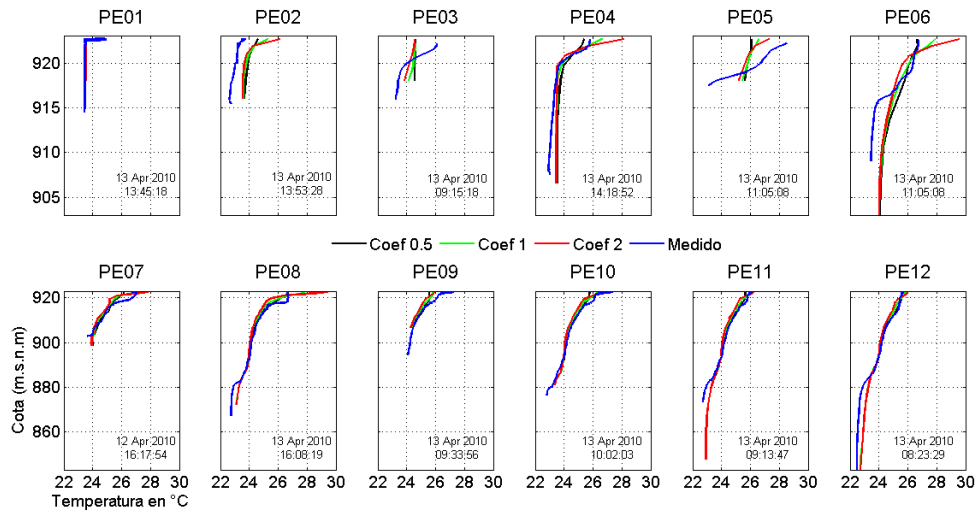


Figura 4-7: simulaciones variando el coeficiente de extinción

- Radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y nubosidad

Al igual que para el campo de viento y el coeficiente de extinción de la luz, se varió espacialmente la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la nubosidad para tratar de representar los cambios en los flujos de calor generados por la presencia de buchón. Los ejercicios consistieron en modificar los ciclos de temperatura y de humedad relativa haciendo que los valores mínimos fueran más elevados, al mismo tiempo que se reducía la radiación de onda corta y se incrementaba la nubosidad en diferentes porcentajes.

- Sensibilidad a cambios en la batimetría

Se comparó la batimetría entregada por EPM con las profundidades encontradas con CTD hasta la estación PE08. Durante el trabajo de campo se pudieron observar algunas otras zonas que no se referenciaron pero que se tiene la certeza de que han cambiado. El ejercicio

consistió en dos simulaciones, una con la malla de cálculo generada a partir de la batimetría 2004-2006 y otra con una malla de cálculo modificada según las profundidades encontradas. Luego se compararon los resultados de las simulaciones en las estaciones estáticas.

4.3.3 Validación del modelo

Para la validación del modelo no se pueden alterar los parámetros del modelo obtenidos en la etapa de calibración ya que el objetivo de la validación es verificar la pertinencia de los resultados del modelo para periodos de tiempo diferentes a los utilizados en la calibración (Palacio, 2002). La validación se hizo con la tercera campaña porque tiene algunas similitudes con la segunda, pero tiene más información de campo. Además, entre la primera y la tercera campaña las diferencias en las variables climatológicas e hidrológicas fueron mayores que entre la primera y la segunda campaña, y se puede hablar de dos escenarios de simulación diferentes. Un primer escenario, el que se utilizó para la calibración, con características de época seca. Un segundo escenario, el de la validación, con características de época lluviosa. En el escenario de validación se aplicaron los mismos criterios físicos tenidos en cuenta para la calibración, pasando por los que modificaban los parámetros a calibrar en el modelo, como los que determinaban condiciones climatológicas e hidrológicas que no pudieron ser medidas estrictamente. Se incrementó el caudal del río Porce en la misma proporción, los cambios en el caudal turbinado se hicieron de la misma manera, los coeficientes de viento variaron de acuerdo a las mismas premisas usadas en la calibración, la nubosidad y la radiación se modificaron igual en las zonas con macrófitas y el coeficiente de extinción se calculó, como ya se indicó, con la misma ecuación.

El nivel del embalse para la tercera campaña se mantuvo inferior a la cota 920, esto cambió las condiciones de las estaciones PE01 y PE02 con respecto a la calibración, haciendo que este tramo, entre PE01 y PE02 tuviera un comportamiento de río. Para la validación entonces no se evaluó la estación PE01.

5.Resultados y análisis

Primero se presenta el análisis del campo de viento. Posteriormente las observaciones y el análisis del trabajo de campo, y finalmente los resultados de la calibración y la validación del ELCOM.

5.1 Campo de viento

Estos son los resultados de los análisis de la información de viento suministrada por EPM y medida en campo. Estos análisis servirán tanto para entender el comportamiento superficial de los perfiles medidos con CTD como para la calibración y validación del modelo numérico. Del análisis general de los datos registrados en la estación climatológica El Mango se observó que las direcciones predominantes del viento son sureste (SE) y noroeste (NO) (Figura 5-1 y Figura 5-2). También se vio, según el ciclo diario que se presenta en la Figura 5-2, que el viento proveniente del NO es el más frecuente, principalmente en las horas de la tarde y la noche, Cerca de las 4 de la tarde alcanza su máxima velocidad, que en promedio no superó los 6 m/s. Entre las 12 de la noche y las 6 de la mañana el viento en promedio es menor a 2 m/s, este viento puede venir tanto del NO como del SE. Entre las 8 y las 11 de la mañana la magnitud del viento se incrementa levemente y proviene con mayor frecuencia del SE.

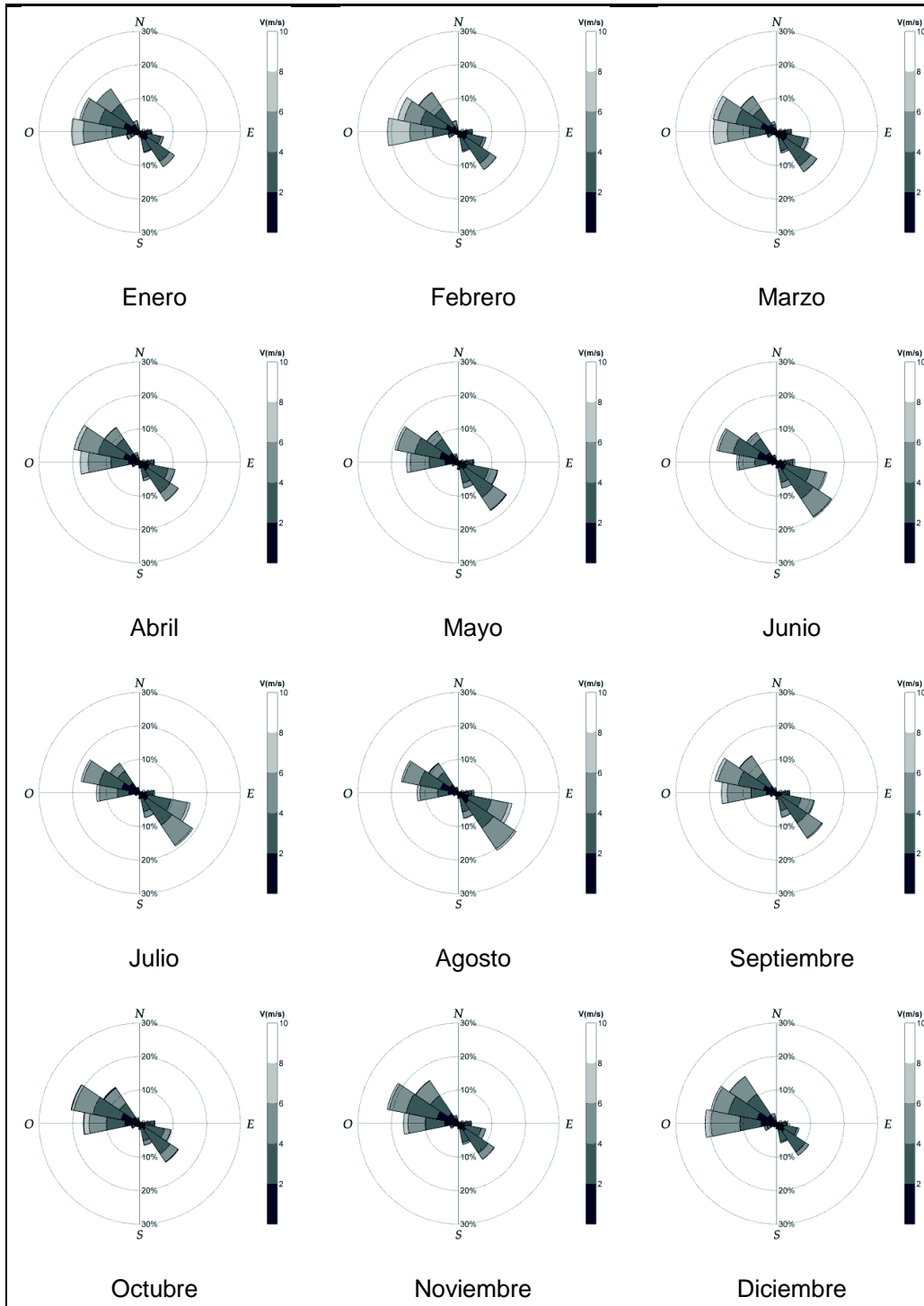


Figura 5-1: rosas de viento mensuales multianuales de registros entre 2001 y 2010 en la estación climatológica El Mango

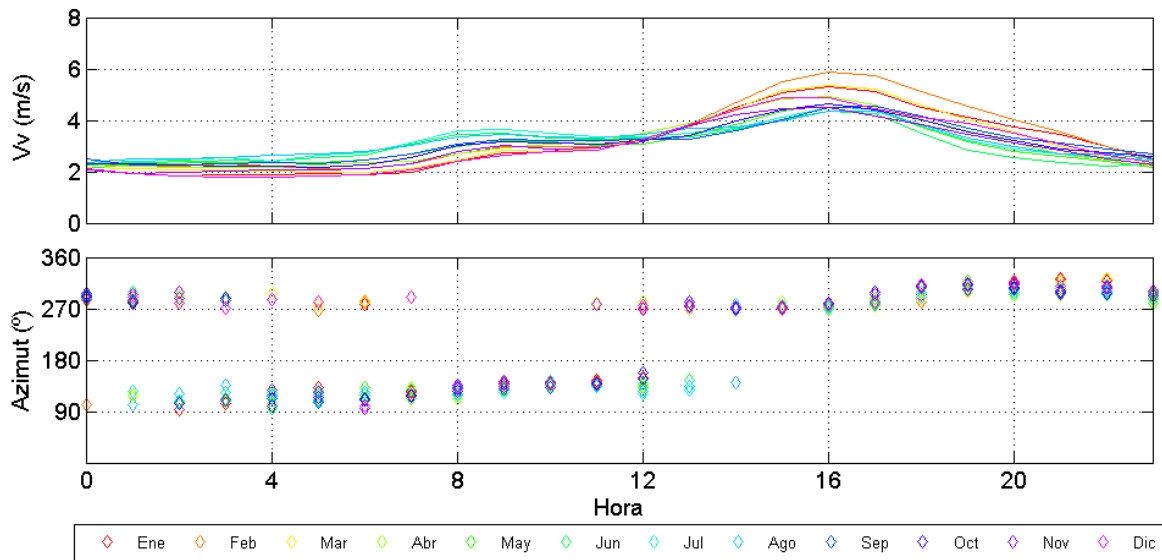


Figura 5-2: comportamiento general del viento sobre la presa. Promedios horarios mensuales multianuales para magnitud del viento (V_v) y mayor frecuencia horaria mensual multianual para dirección del viento en el embalse Porce II, de registros entre 2001 y 2010 en la estación climatológica El Mango.

Luego de la comparación del registro de dirección del viento de la estación El Mango con las estaciones Flotante Presa y Flotante Isla, cuyas ubicaciones se presentan en la Figura 5-3. La estación Flotante Presa es la más cercana a la presa. Se observó que cuando el viento medido en la estación El Mango viene desde el SE, bajando por el cañón, en ambas posiciones de la estación Flotante el viento también viajaba de este sentido y lo mismo sucedió cuando el viento venía desde el NO, ascendiendo por el cañón. Este resultado indicaría que el viento se acopla a la orografía del embalse Porce II, y responde la hipótesis inicial para el viento. A continuación se buscaron las relaciones entre las magnitudes.

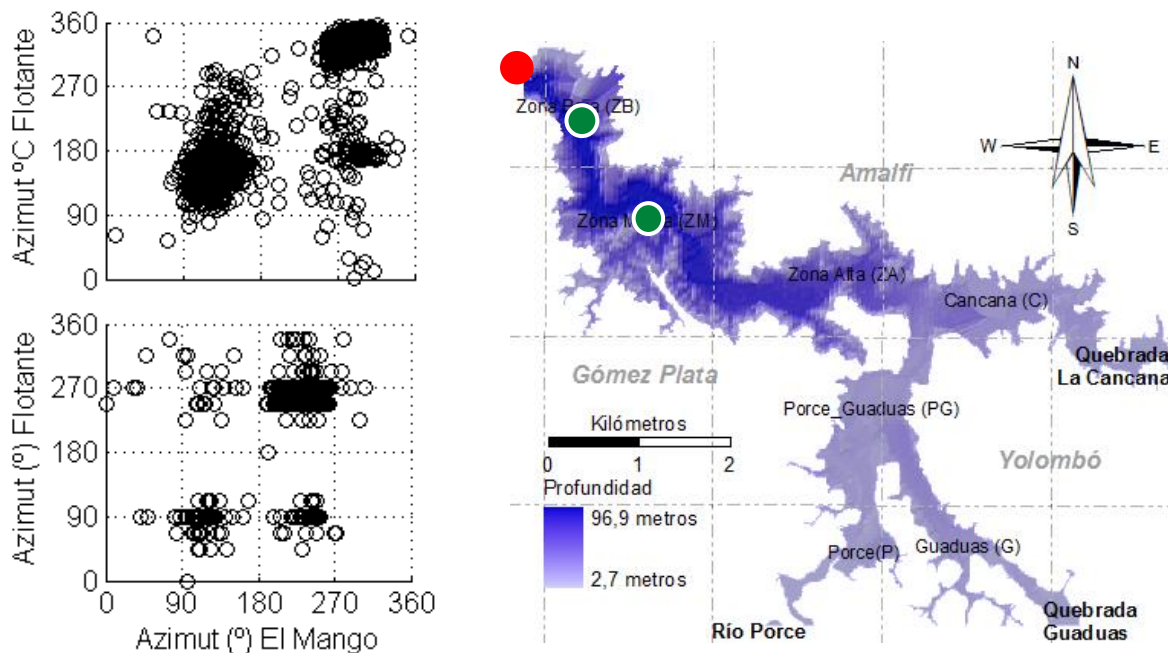


Figura 5-3: comparación entre las direcciones de viento registradas en la estación El Mango (punto rojo) y las direcciones del viento registradas en dos estaciones flotantes (puntos verdes). En el panel superior se compara la estación El Mango con la estación Flotante Presa. En el panel inferior se compara la estación El Mango con la estación Flotante Isla.

Primero se separó la información de viento por direcciones y posteriormente en rangos de velocidad. En la Figura 5-4 se compara la magnitud del viento registrada en la estación El Mango con la estación Flotante Presa. En el panel superior se comparan las magnitudes provenientes del NO y en el panel inferior las magnitudes provenientes del SE. En la primera columna de la izquierda se comparan los valores registrados en la estación Flotante Presa cuando en la estación El Mango el viento tiene magnitud inferior a 2 m/s, en la segunda columna cuando en la estación El Mango la magnitud está entre 2 y 4 m/s y así hasta la columna 4 donde se compara los valores superiores a 6 m/s.

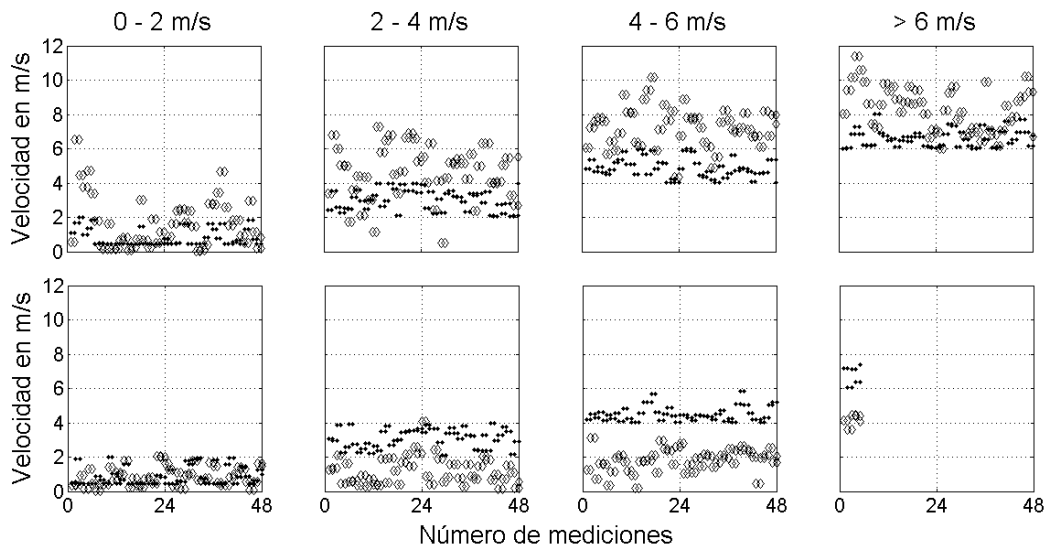


Figura 5-4: comparación entre magnitudes de viento registradas en 2008 entre la estación El mango, puntos negros, y la estación Flotante - Presa, rombos. En el panel superior se comparan las magnitudes provenientes del Noroccidente, en el panel inferior se comparan las magnitudes del suroriente.

En la Figura 5-4 se comparan de nuevo las magnitudes registradas en la estación climatológica El Mango con la estación Flotante Isla. En esta ocasión en la estación climatológica El Mango no hubo valores superiores a 6 m/s, por ello la cuarta columna no aparece.

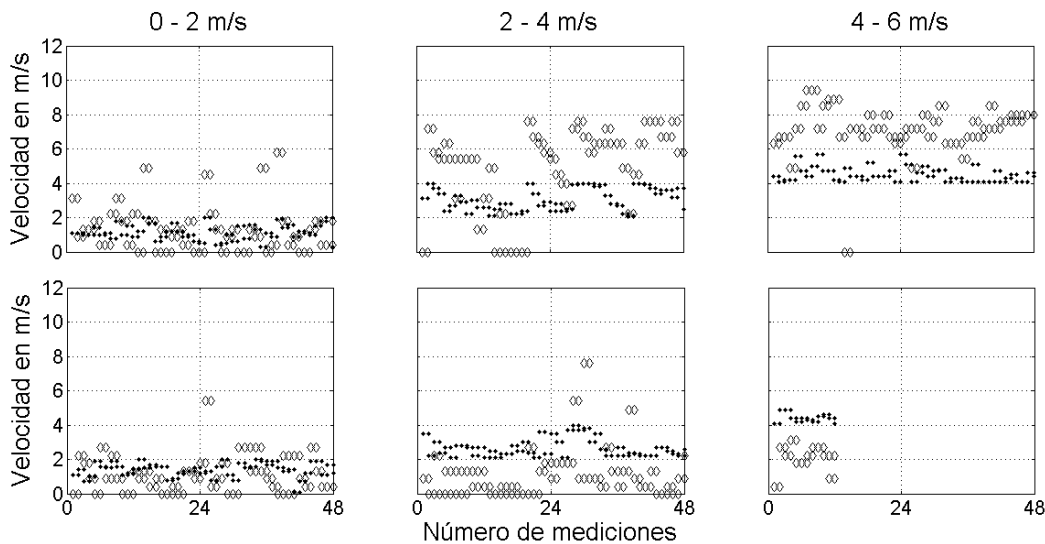


Figura 5-5: comparación entre magnitudes de viento registradas en 2010 entre la estación El mango (puntos negros), y la estación Flotante - Isla (rombos). En el panel superior se

comparan las magnitudes provenientes del Noroccidente, en el panel inferior se comparan las magnitudes provenientes del suroriente.

Tanto en la Figura 5-4 como en la Figura 5-5 se observa, de manera general que cuando el viento viene del NO la velocidad registrada en las estaciones flotantes es mayor a la registrada en El Mango y cuando el viento viene del SE, la velocidad registrada en El Mango es mayor a la velocidad registrada en las dos estaciones flotantes.

En la Ecuación (5-1) se presentan los valores encontrados con la siguiente relación:

$$f = \frac{Vv_f}{Vv_M} \quad (5-1)$$

donde Vv_f es la velocidad del viento registrada en la estación flotante, Vv_M es la velocidad del viento registrada en El Mango y f es el factor de viento.

Tabla 5-1: factores de viento obtenidos del análisis entre la estación climatológica El mango y las estaciones flotantes

Estación	Rangos de velocidad (m/s)	Noroeste			Sureste		
		f Promedio (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Mediana (m/s)	f Promedio (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Mediana (m/s)
Flotante - Presa 2008	0.1 - 2	4,37	3,25	3,66	1,87	1,34	1,57
	2.1 - 4.0	1,69	0,61	1,68	0,49	0,26	0,46
	4.1 - 6.0	1,37	0,28	1,37	0,41	0,15	0,40
	>6	1,26	0,19	1,25	0,61	0,05	0,59
Flotante - Isla 2010	0.1 - 2	1,97	2,08	1,59	1,63	2,59	1,08
	2.1 - 4.0	1,46	0,77	1,67	0,49	0,53	0,36
	4.1 - 6.0	1,62	0,33	1,63	0,47	0,17	0,49

A modo de ejemplo se explica el dato de la primera fila, igual a 4,37. Este indica que la magnitud del viento en cualquier parte del embalse cuando éste proviene del NO y es inferior a 2 m/s podría ser incrementado en promedio 4,37 veces. En otras palabras, el viento que asciende por el cañón menor a 2 m/s, al pasar por la presa registra una magnitud aproximadamente 4,37 veces menor a la magnitud registrada en la superficie del agua en el mismo momento, según la estación Flotante –Presa. De acuerdo a la estación Flotante Isla

el valor registrado en El Mango para este mismo rango de velocidad sería aproximadamente 1,97 veces inferior al registrado en la Isla.

En la Tabla 5-2 se observa que los factores de viento asociados a vientos provenientes del NO incrementan el valor de la magnitud leído en presa, mientras que los asociados al SE solo lo incrementan para magnitudes inferiores a 2 m/s, para los demás rangos los factores de viento reducen la magnitud. Esto quiere decir que cuando el viento sube por el cañón desarrolla mayores velocidades hacia la isla, cuando baja por el cañón las mayores velocidades se alcanzan en la presa, excepto para el primer rango de velocidad, entre 0 y 2 m/s. Por esta razón, los factores de viento aplicados a las estaciones virtuales no son únicos y dependen también de la ubicación de la estación. En la Figura 5-6 se presentan las 51 estaciones virtuales distribuidas en el área de interés.

En la Tabla 5-2 se presentan los valores de los factores de viento básicos cuando los vientos provienen del NO o del SE. Durante las simulaciones, como se presenta en el capítulo respectivo, el factor se modificó hasta un máximo del 20% de acuerdo a la zona y la dirección del viento. También hubo zonas en las que se redujo a cero, como las zonas cubiertas totalmente por *Eichhornia crassipes*. Este porcentaje se mantuvo constante al momento de la validación del modelo.

Tabla 5-2: Factores de viento aplicados a campo de viento

Dirección	0,1 -- 2 m/s	2,1 -- 4 m/s	4,1 -- 6 m/s	> 6 m/s
NO	2	1,5	1,0	1,0
SE	1,0	0,3	0,2	0,3

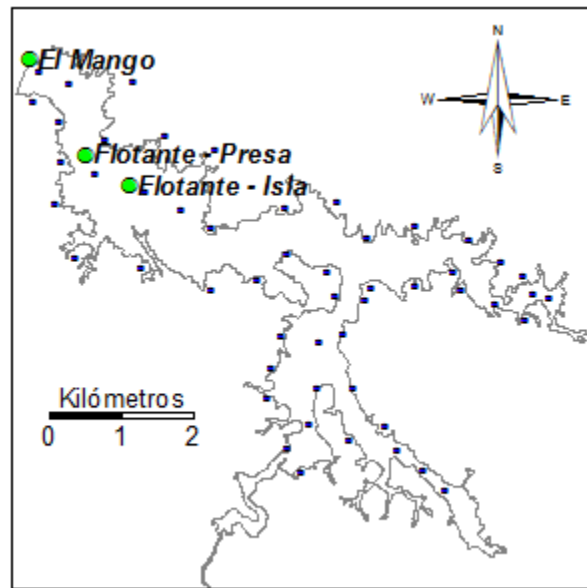


Figura 5-6: estaciones climatológicas reales en (verde) y virtuales (azul).

5.2 Descripción general de las campañas de campo

El embalse Porce II tuvo diferencias significativas entre las tres primeras campañas. Durante la primera campaña se observaron perfiles en el cuerpo principal con dos cambios bruscos en la temperatura, el primer cambio en la zona superficial y el segundo cambio cerca a los 40 metros de profundidad. Durante la segunda y la tercera campaña estas termoclinas a los 40 metros no se observaron.

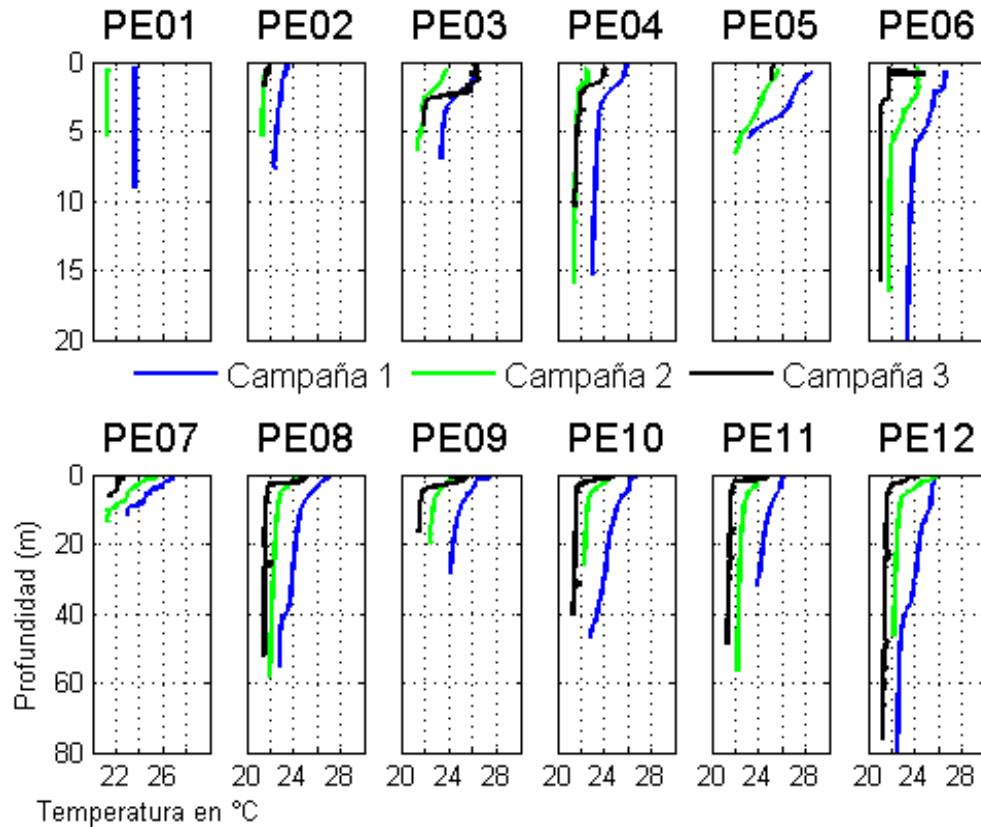


Figura 5-7: perfiles medidos durante las tres campañas de campo en las estaciones estáticas.

Las campañas dos y tres se parecen, para ambas los perfiles de temperatura solo presentaron una termoclina superficial, de ahí hacia abajo la temperatura fue relativamente constante, y más fría que en la primera campaña (Figura 5-7). En cuanto al caudal del río Porce, éste se fue incrementando con las campañas. En la tercera campaña el caudal fue casi tres veces mayor al de la primera campaña. El nivel del embalse en la primera y segunda campaña fue similar, y en general superior a la cota 920, en la tercera campaña fue menor, y bajó hasta la cota 917 (Figura 5-8). Esta diferencia de nivel se reflejó en las velocidades a la entrada del embalse, según las apreciaciones visuales. En la tercera campaña se notó mayor velocidad del agua en el embalse hasta aproximadamente la estación PE07.

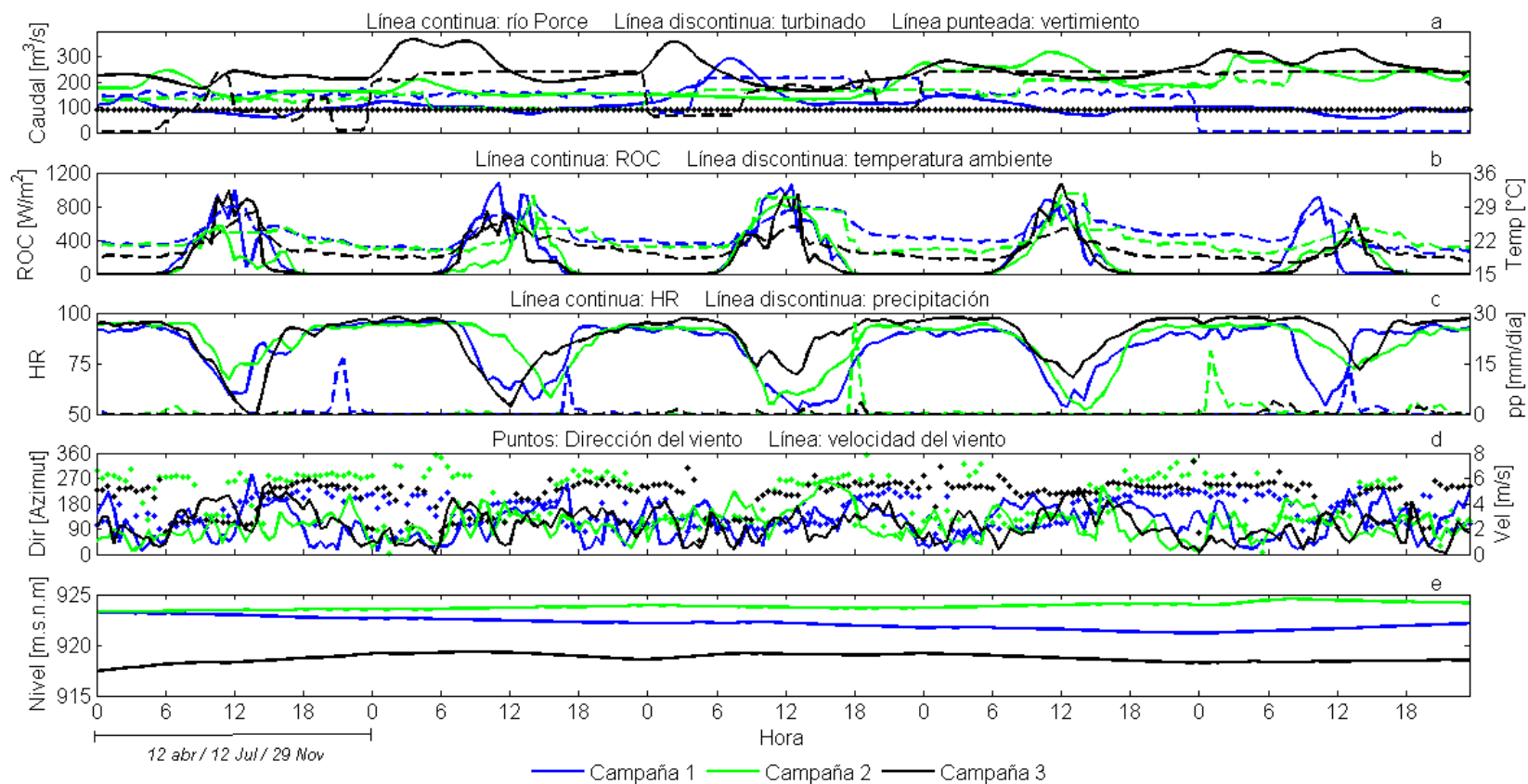


Figura 5-8: variables climatológicas e hidrológicas registradas en la estación el Mango durante la primera (azul), la segunda (verde) y la tercera (negra) campaña.

La temperatura ambiente fue descendiendo con las campañas. La radiación de onda corta y la humedad relativa se mantuvieron constantes. La precipitación sobre el embalse fue menor en la tercera campaña y más fuerte durante la segunda. La magnitud del viento fue similar en las campañas. La magnitud del viento no superó los 8 m/s y la dirección siguió básicamente su patrón, la mayor parte del tiempo asciende por el cañón (viene del NO) y entre las 6 a.m y 12 m baja por el cañón (viene del SE).

El viento medido en la estación El Mango durante la primera campaña registra valores de dirección que oscilan entre 210 y 90 grados azimutales. La tendencia histórica indica que los vientos que ascienden por el cañón vienen del NO y los vientos que descienden por el cañón provienen del SE (Figura 5-8). En este caso los vientos que suben por el cañón provienen del Suroeste (SO) y los vientos que bajan por el cañón provienen del este (E).

La radiación de onda corta fue similar durante los tres muestreos, siendo quizás solo un poco mayor en el primero.

5.3 Pluma de entrada del río Porce en las campañas de campo

La idea de utilizar un modelo numérico es que éste sea otra herramienta más para entender mejor el problema. Con el modelo numérico se puede obtener información de velocidades, tiempo de residencia y tiempo de viaje que no pudieron ser medidos.

La manera en la que la pluma del río Porce se desplaza dentro del embalse depende de varios factores. Depende del caudal y la temperatura con que llega, del nivel y la temperatura del embalse, entre otras. Para identificar este movimiento se midieron, como se indicó, perfiles a lo largo de transectos longitudinales y transversales. El transecto principal es el que va a lo largo de todo el embalse, seguido de transectos transversales en el cuerpo principal. Luego se presentan transectos en las entradas de los brazos Guaduas y La Cancana. Se utiliza el modelo para reforzar algunas ideas. En la Figura 5-9 se presenta las temperaturas y los caudales del río Porce, y el nivel de agua del embalse durante las tres

campanas de campo. Como se indicó, se tienen pocos valores de la temperatura de entrada del río Porce, excepto para la tercera campaña (en negro), donde el sensor de temperatura registró hasta el jueves 2 de diciembre. Es posible que la temperatura del río Porce haya sido mayor en la primera campaña que en la segunda y la tercera. Las dos últimas campañas tienen aparentemente temperaturas similares.

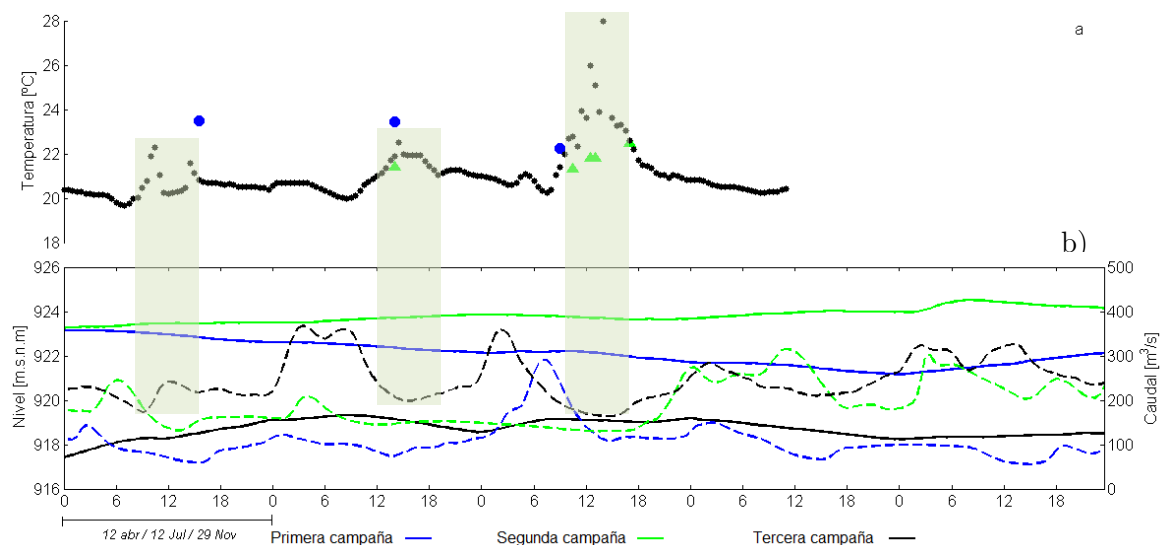


Figura 5-9: temperatura (a) del río Porce, (b) caudales del río Porce y niveles del embalse Porce II.

Los picos que se observan en la temperatura del río Porce en la tercera campaña pueden estar relacionados con la forma en la que se instaló el sensor. El sensor se instaló a una profundidad fija, por lo que quedó expuesto al vaivén del nivel del río. Si baja el caudal, como se observa en la Figura 5-9, baja el nivel y el sensor puede quedar por fuera del agua o muy superficial, e incrementar su temperatura. Como se mostrará más adelante, los caudales y las temperaturas registradas en el río Porce podrían ser la respuesta a la diferencia de la estructura térmica entre las campañas. A continuación se muestra el comportamiento del río Porce por campaña.

5.3.1 Primera campaña

Se recuerda que la primera campaña se desarrolló entre el 12 y el 16 de abril de 2010.

En la Figura 5-10 se observan los perfiles medidos y su interpolación espacial a lo largo del embalse Porce II, el 12 de abril de 2010. Las líneas negras discontinuas en las interpolaciones, paneles b), c) y d), indican la posición donde se tomó el perfil.

En las estaciones PE01 y PE02 la turbidez fue superior a 100 FTU (ver Figura 5-10 panel a Turbidez) y la conductividad inferior a 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La estación PE01 está justo en la llegada del río Porce al embalse. En esta estación generalmente se observó un perfil uniforme tanto en temperatura como en conductividad y turbidez. La turbidez más alta y la conductividad más baja siempre se registraron en la estación PE01, por lo que se asocia el paso del río Porce por las demás estaciones con estas dos características. La alta turbidez y la baja conductividad fueron una señal que se observa claramente en el cuerpo principal, entre 20 y 40 metros de profundidad aproximadamente. A medida que avanza el río en el embalse la turbidez disminuye pero la conductividad se incrementa. Puede deberse a la pérdida de momentum y posterior precipitación de las partículas que viajan con la pluma, y también al fenómeno conocido como atrapamiento de agua del medio circundante por mezcla, lo que modifica su temperatura y en general sus características.

En este caso se ve que el agua que rodea la corriente principal tiene menor turbidez, de manera que cuando es arrastrada o atrapada hacia la pluma le reduce su concentración de sólidos. La conductividad también sirvió para observar el paso de la corriente principal del río Porce. En los perfiles PE08, PE11 y PE12 se ven dos termoclinas, una superficial, no mayor a los 4 metros de profundidad y otra a los 40 metros de profundidad. La primera termoclina asociada a procesos superficiales y la segunda al paso de la pluma del río Porce. En la Figura 5-10 se observa también un proceso relacionado con el viento entre los perfiles PE08 y PE11. El tiempo que hay entre estos dos perfiles es menor a 10 minutos, sin embargo los perfiles de temperatura en superficie son considerablemente diferentes. Esta situación se debe al esfuerzo persistente del viento sobre el agua, y es presentada en el numeral 4.4, llamado Procesos superficiales. En este numeral se discute el mismo fenómeno pero observado durante el nictemeral.

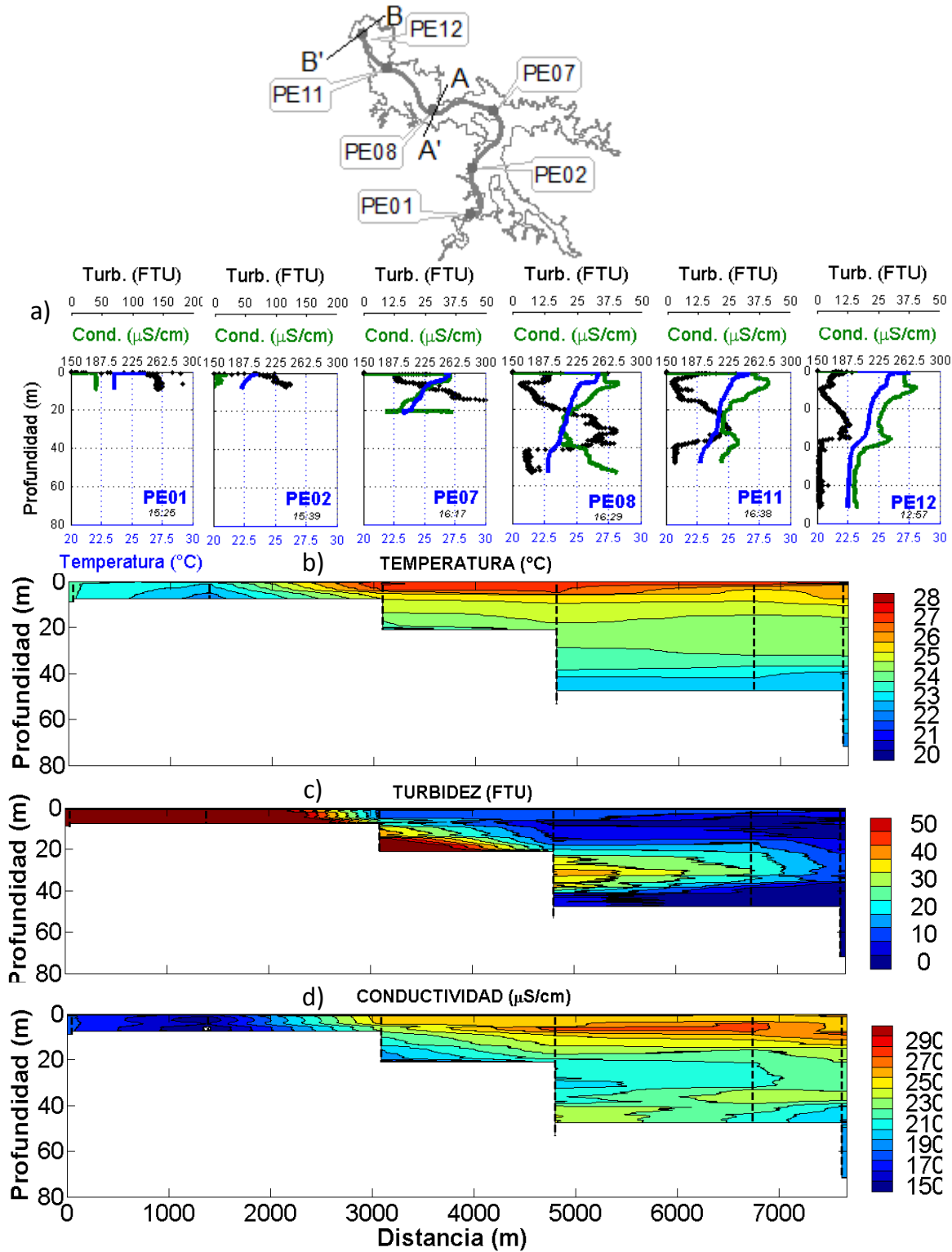


Figura 5-10: ubicación de estaciones, cortes transversales, y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de abril de 2010

En la Figura 5-11 se muestran los perfiles medidos y su interpolación espacial a lo largo del embalse Porce II el 16 de abril de 2010. La temperatura de fondo se mantuvo cerca a los 22,5 °C. La turbidez se redujo a medida que avanzó la pluma, e igualmente la conductividad en la zona de fondo se redujo hacia la presa. Según el comportamiento de la pluma durante la primera campaña y la ubicación de la estructura de captación, con el azud de captación en la cota 900,4, es probable que el agua captada tuviera poco tiempo de permanencia comparado con el agua que se encontraba por debajo de la corriente principal, además de que tuviera en mayor medida características de la pluma de entrada que del agua que rodeaba la pluma. Como se observó en la Figura 5-10 y se presentará en la Figura 5-11 la pluma registrada cerca de la presa, en la estación estática PE12, llega con una profundidad de la capa superior de 20 metros aproximadamente. Considerando que el nivel del embalse se mantuvo superior a la cota 920 m.s.n.m durante la primera campaña es de esperar que el agua captada haya sido la de la pluma.

Como se ve en el transecto longitudinal del 12 de abril (Figura 5-10 panel a) y en el del 16 de abril (Figura 5-11 panel a), la forma de los perfiles de conductividad en el cuerpo principal, desde PE08 hasta PE12 encaja casi perfectamente con la forma de los perfiles de turbidez. La determinación de la conductividad es una medida de los sólidos disueltos. Los sólidos están relacionados con los procesos de transformación de materia y éstos con el tiempo de retención hidráulica. Los bajos valores de conductividad se asocian entonces con el paso de la pluma del río Porce, que tendría menor tiempo de permanencia en el embalse.

A continuación se presentan dos ejercicios realizados con el ELCOM.

En el primer ejercicio se quiso observar el paso de la pluma del río Porce en dos cortes transversales cercanos a las estaciones PE08 y PE12 (Figura 5-10). Como se sabe, la pluma viaja a mayor velocidad que el agua que la rodea. En los cortes se busca principalmente ver la profundidad, la ubicación con respecto a las orillas y el espesor de las zonas de mayor flujo.

En la Figura 5-12 se presentan dos cortes transversales y cuatro perfiles de velocidad. El primer corte pasa por PE08, paneles a) y b), y el segundo corte pasa por PE12, paneles c) y d). La ubicación en la sección transversal de los perfiles simulados se marca en líneas discontinuas blancas en cada corte. Las velocidades en el sentido longitudinal están en los paneles a) y c), y en los paneles b) y d) están las velocidades transversales.

En la estación PE08 (Figura 5-12 – panel a) se observa el paso de la corriente principal por la zona intermedia, que inicia a una profundidad aproximada de 10 metros y tiene un espesor cercano a 25 metros. En la estación PE12 (Figura 5-12 – panel c) también se ve el paso de la corriente principal, con una leve inclinación hacia la margen izquierda del embalse (hacia el sur) e igualmente con un espesor aproximado de 20 metros que inicia a 10 metros de profundidad.

Si se observan los perfiles PE08 y PE12 de las Figura 5-10 y Figura 5-11, se nota que el modelo, en la calibración, acierta aceptablemente en cuanto al espesor de la pluma, sin dejar de enfatizar que al parecer está transportando la pluma un poco por encima de lo que dicen los datos (ver Figura 5-11). Esto sirve de antesala para presentar el siguiente ejercicio, que tiene que ver con la conductividad eléctrica y su relación con el tiempo de residencia del agua en el embalse. El modelo ELCOM calcula el tiempo de permanencia o edad del agua dentro del embalse en cualquier parte y a cualquier profundidad desde un punto de vista Euleriano. Es decir, se escoge un punto en el espacio y a las partículas que pasan por él se les mide el tiempo que llevan en el embalse. Se asume que al inicio de las simulaciones las partículas de agua arrancan con tiempo cero, de la misma forma, el agua afluyente también entra al embalse con tiempo cero. El módulo se conoce como IRETENTION.

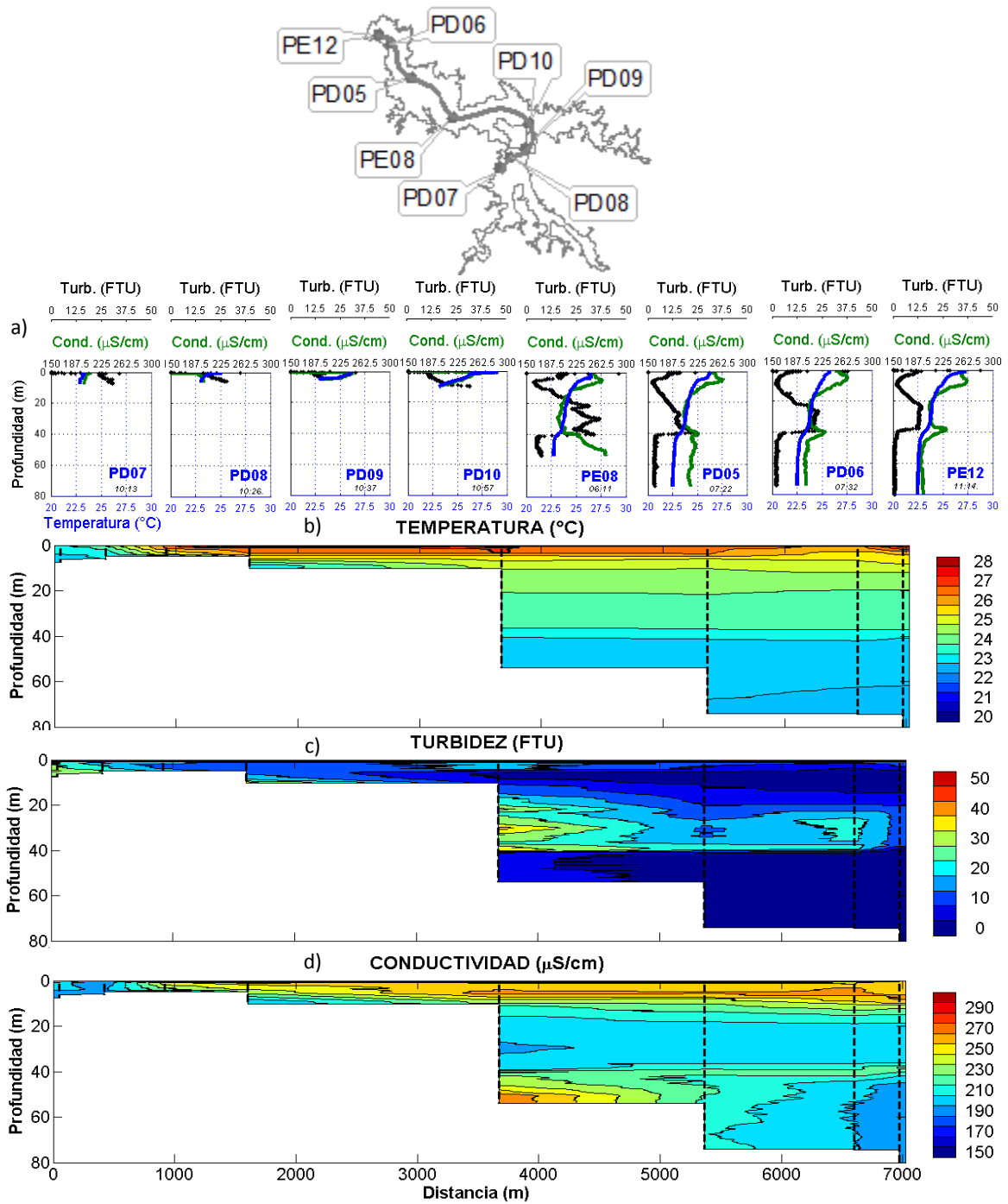


Figura 5-11: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 16 de abril de 2010.

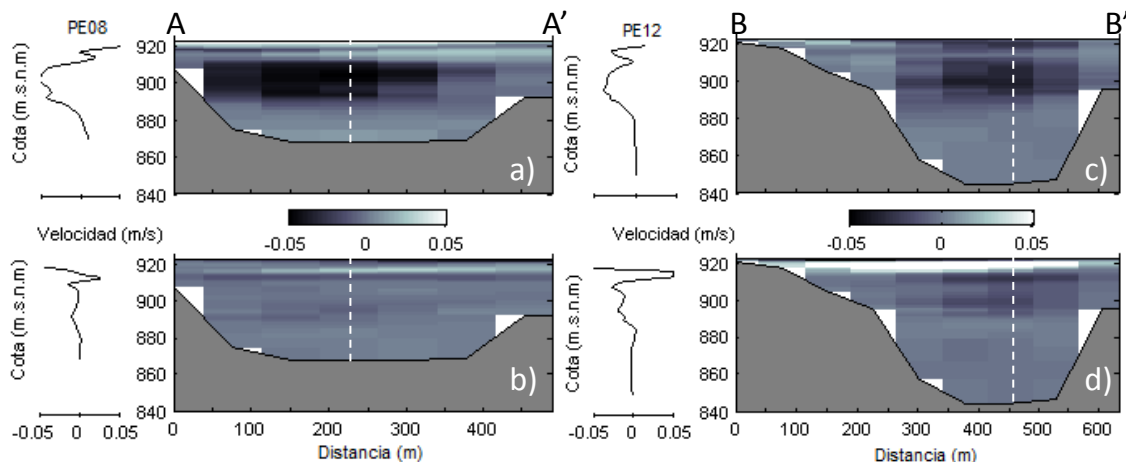


Figura 5-12: velocidades longitudinales, paneles a) y c), y transversales, paneles b) y d) en las estaciones PE08 y PE12, respectivamente. Para las velocidades longitudinales los valores negativos indican que el agua va hacia el occidente, los positivos, que va hacia el oriente. Para las velocidades transversales los valores negativos indican que el agua va hacia el norte; los valores positivos que va hacia el sur.

Los perfiles y las interpolaciones presentadas en la Figura 5-10 y la Figura 5-11, indicaron que podría existir una zona, por debajo de los 40 metros de profundidad, que tiene mayor tiempo de permanencia en el embalse que el agua de la pluma. Esta zona es la cercana a la estación PE08. En la Figura 5-13 se presenta el tiempo de retención hidráulica o edad del agua, obtenido con el modelo ELCOM. Se comparan tres profundidades para las estaciones PE08 y PE12, además se presenta el caudal con el que se hizo la simulación.

En el eje de las abscisas está el tiempo de simulación, para este caso de 30 días. En el eje de las ordenadas está la edad del agua en el embalse que también llamaremos el tiempo de retención hidráulica. Los días de muestreo están sombreados. Desde la estación PE01 hasta la estación PE08 hay aproximadamente 6 km de longitud. La cota 900, que es una de las alturas a las que se evaluó la edad del agua en PE08 y PE12 está a la profundidad a la que viaja la pluma del río Porce.

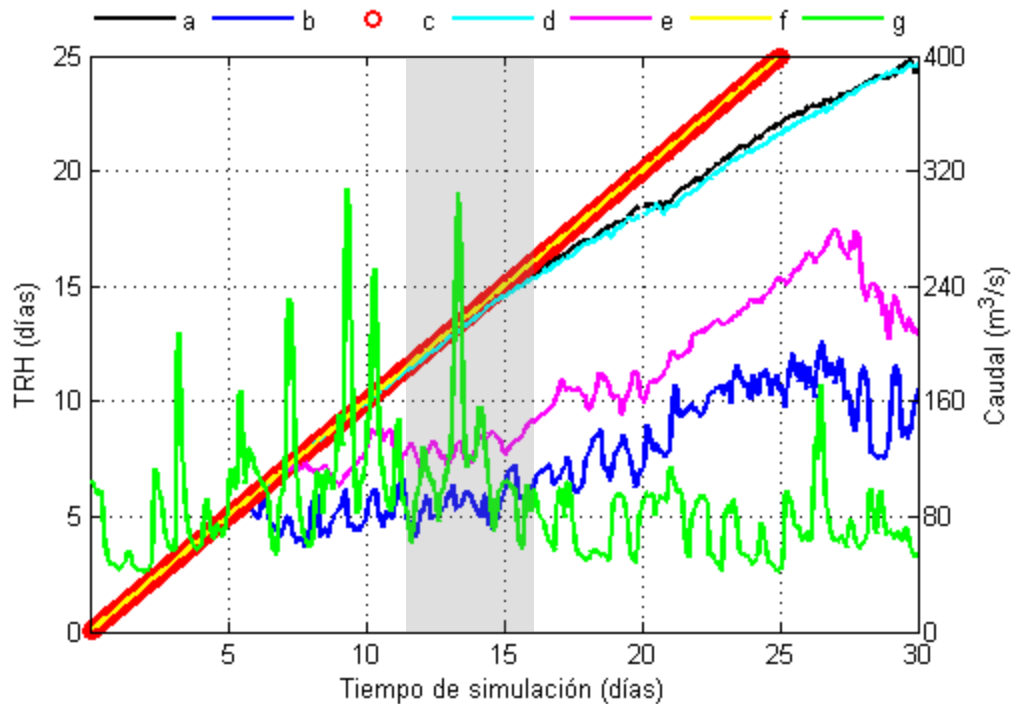


Figura 5-13: tiempo de retención hidráulica para tres profundidades en la estación PE08 (a=920,b=900 y c=880 m.s.n.m) y en la estación PE12 (d=920,e=900 y f=880 m.s.n.m), además el caudal del río Porce (g). La franja gris sombrea los días de la campaña.

Todas las líneas de la Figura 5-13 van en ángulo de 45 grados hasta un poco después del quinto día de simulación, donde la línea azul (cota 900 en la estación PE08) se separa. Esto indica que después de haber transcurrido 5,66 días, el agua que llegó a la estación PE08 a la altura de 900 m.s.n.m es agua que lleva menos tiempo en el embalse, es decir, agua que no estaba al inicio de la simulación, o sea que entró por algún afluente. Como se ha demostrado con las figuras anteriores, a esta altura viaja la pluma del río Porce. Se entiende entonces, que el tiempo que tarda en llegar agua del río Porce desde la estación PE01 hasta a la estación PE08 sería de aproximadamente 5,66 días. Esto se esperaría bajo las condiciones de caudales y nivel del ejercicio. Las líneas b y e, a la altura de la corriente principal, tienen menor tiempo de retención que las demás. La primera perturbación en la línea b, como se explicó, se da después de pasados 5,66 días, en la línea e se da aproximadamente a los 7,056 días, indicando nuevamente el tiempo de viaje desde PE01 hasta PE12.

Es posible que la conductividad por debajo de los 40 metros en PE11 y PE12 sea menor que en PE08, porque a PE12 llegan menos sólidos debido a la mezcla de la pluma, como se nota en la turbidez.

Retomando la idea principal, entonces las zonas por debajo de 40 metros de profundidad, líneas c, círculos rojos y f, línea superpuesta amarilla, no serían perturbadas por el río Porce, tendrían mayor tiempo de permanencia y por lo tanto, se esperaría que su conductividad eléctrica fuera mayor. La edad del agua a esta profundidad no puede ser determinada porque es mayor al tiempo de simulación.

En la Figura 5-14 se presenta un transecto transversal del 15 de abril cerca a la estación PE08. El transecto inicia en la margen izquierda del embalse. En él se observa homogeneidad transversal en la temperatura. En los perfiles PD07 y PD08, se da el cambio brusco en la temperatura aproximadamente a 40 metros de profundidad, como fue habitual durante la primera campaña en el cuerpo principal del embalse. Este cambio se asocia al paso de la corriente principal. Los valores más altos de turbidez se aprecian entre 20 y 40 metros de profundidad, levemente recostados hacia la margen izquierda. La conductividad más alta se vio en profundidades superiores a 40 metros y en superficie.

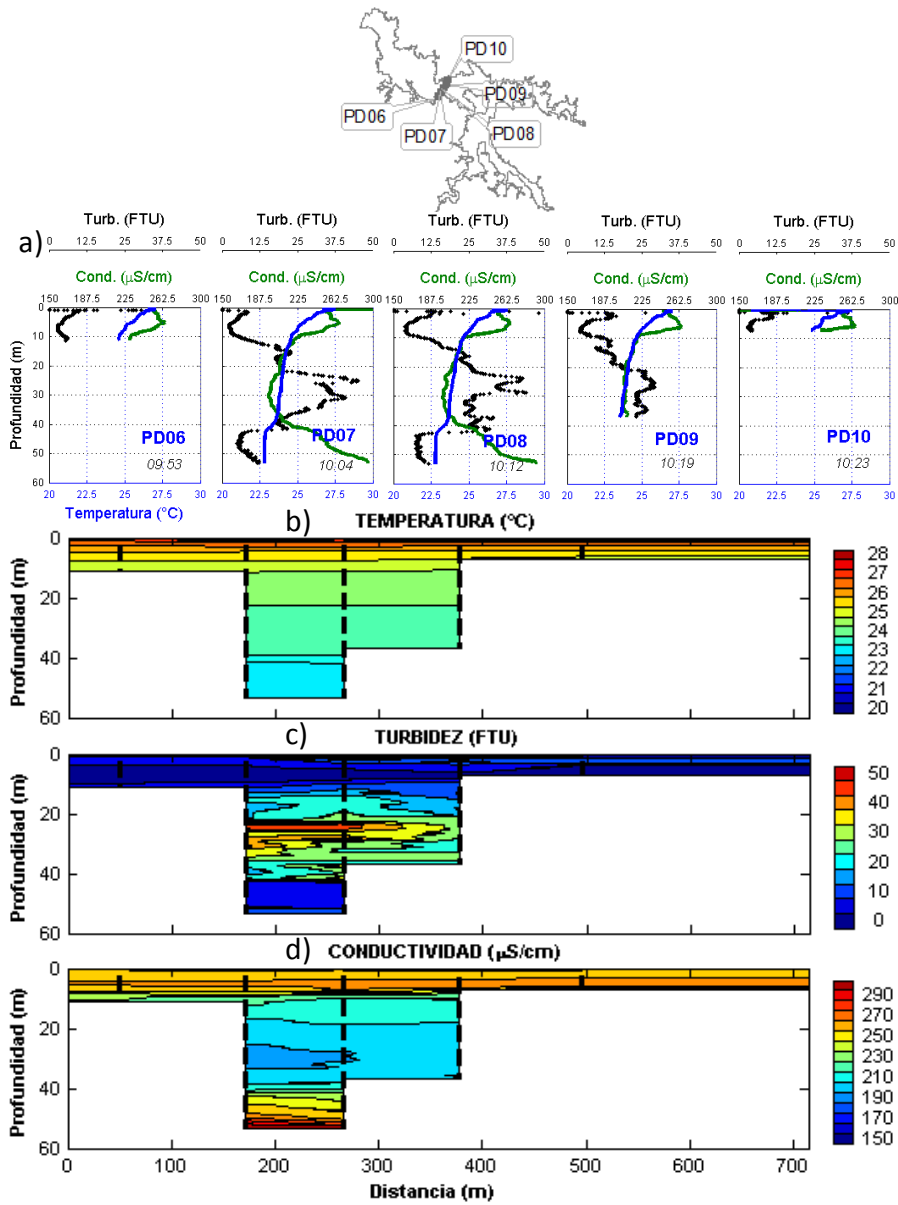


Figura 5-14: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto transversal el 15 de abril de 2010 cerca de la estación PE08.

Posterior a este transecto se presenta en la Figura 5-15 un transecto transversal aguas abajo, cercano a la estación PE11. Igualmente inicia en la margen izquierda del embalse. En este transecto es evidente la reducción en la turbidez, no existen valores altos de conductividad en la zona profunda, pero la termoclina a los 40 metros de profundidad se mantiene.

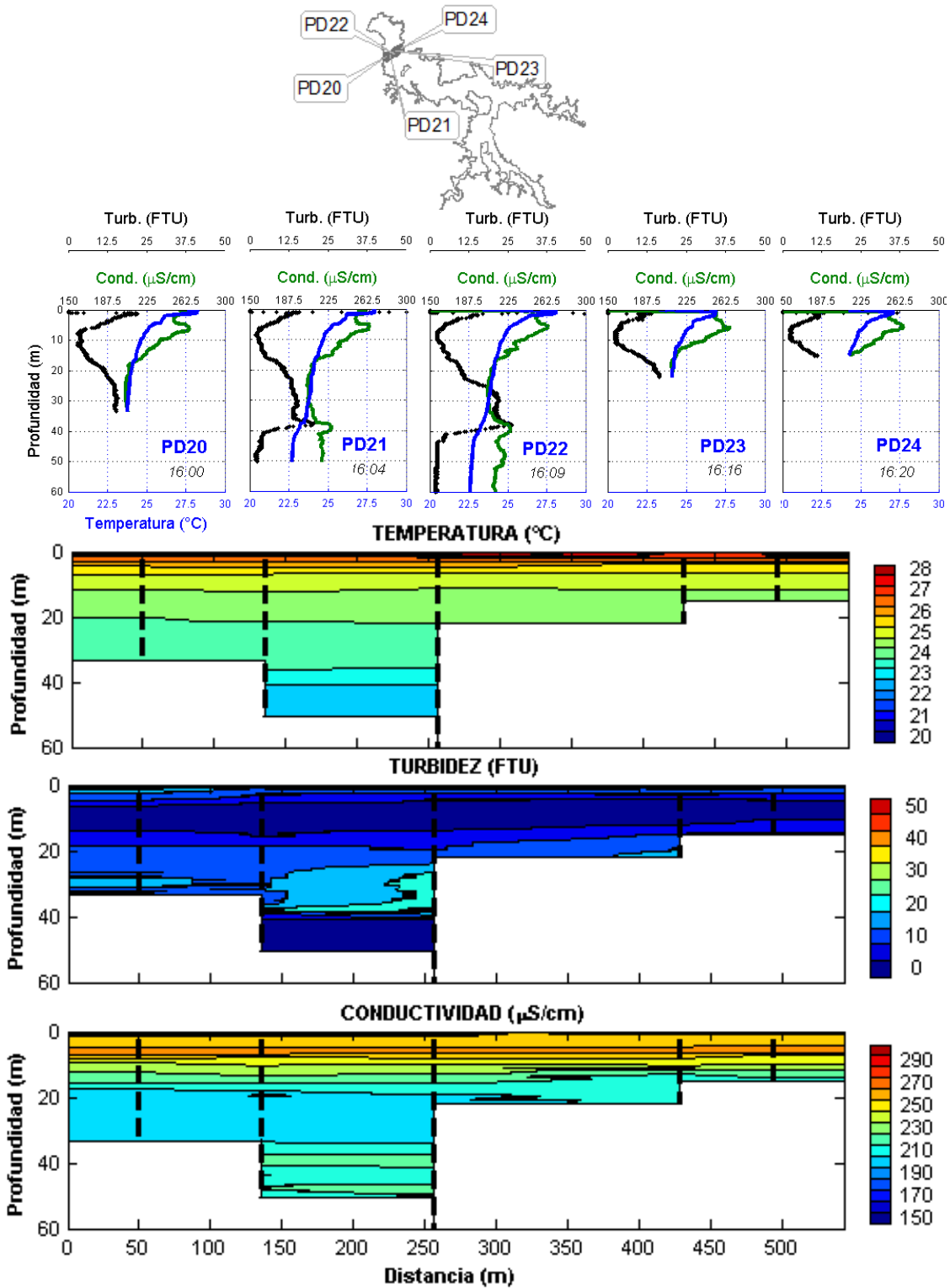


Figura 5-15: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto transversal el 15 de abril de 2010 cerca de la estación PE11.

Hasta el momento se han expuesto algunas evidencias con las cuales se puede explicar el comportamiento general de la pluma del río Porce en el embalse durante la primera campaña. Según se ha mostrado, la pluma del río Porce viaja como una pluma de fondo, hasta un lugar no determinado entre PE07 y PE08, a partir de este punto, la pluma sigue como una pluma intrusiva que llega hasta la presa, y se mueve entre los 20 y 40 metros de profundidad aproximadamente, con una considerable reducción en la turbiedad con relación a la registrada en PE01.

En la Figura 5-16 se muestra un transecto longitudinal que inicia en la estación PE01, pasa por la estación PE02 y entra al brazo Guaduas.

El perfil medido en la estación PE01 muestra homogeneidad en todas las variables. En la estación PE02 se ve un leve incremento en la temperatura superficial y un descenso en la temperatura de fondo con relación a lo registrado en PE01. La conductividad eléctrica es igual a la registrada en PE01 hasta aproximadamente 4 metros de profundidad, desde donde se reduce suavemente. En este mismo punto se incrementa la turbidez hacia el fondo.

La estación PE04 estuvo cubierta con macrófitas durante toda la campaña. En esta estación la temperatura y la conductividad se incrementan en la zona superficial. En la zona de fondo, a partir de los 8 metros de profundidad, se incrementa la turbidez y la conductividad se reduce. Aunque no se ve claramente, según lo que se observa en el panel b) de la Figura 5-16, se cree que el río Porce entró al brazo Guaduas en mayor medida como una pluma intrusiva, entre los 4 y los 12,5 metros de profundidad. En este rango la temperatura es similar a la registrada en la estación PE01. Además, la temperatura por encima del rango supera los 24 °C, y por debajo es inferior a 23 °C. Es posible que parte del agua entre también al brazo Guaduas como una pluma superficial, pero por la presencia de macrófitas no se da tanto valor a esta hipótesis, y se descarta una pluma de fondo porque la temperatura registrada en la parte profunda del perfil es 0,5 °C menor a la registrada en la estación PE01 y el momentum tampoco se considera tan fuerte para lograr que la pluma se hunda lo suficiente.

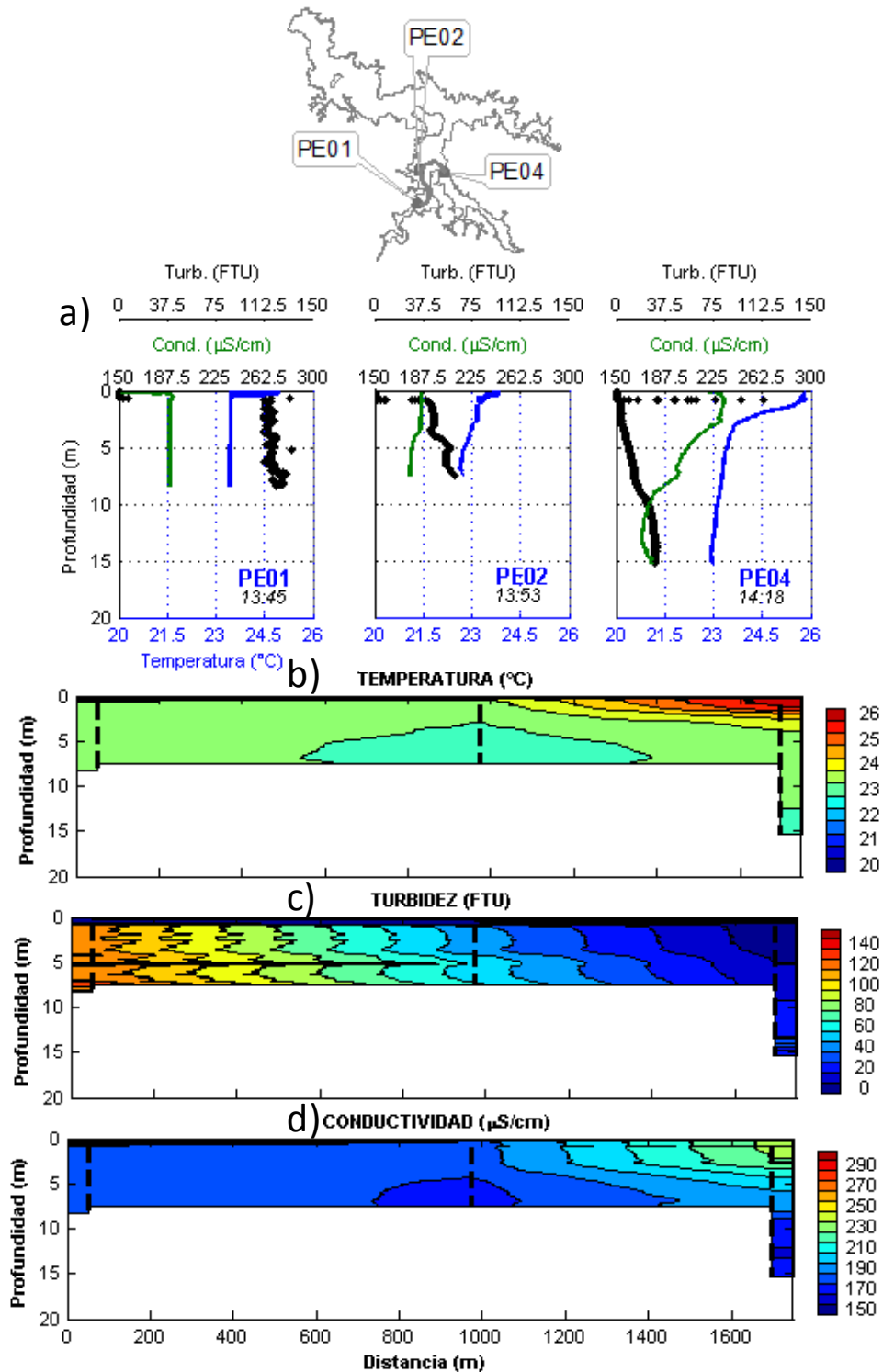


Figura 5-16: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 13 de abril de 2010.

En la Figura 5-17 se muestra un transecto longitudinal realizado el 16 de abril de 2010. El transecto atraviesa un parche de macrófitas. El primer perfil, PD07, se hace antes del colchón de macrófitas, los dos siguientes en zonas intermedias y el último al finalizar el colchón de macrófitas. Las macrófitas no solo actúan en el flujo de calor sino que también lo hacen obstaculizando los flujos superficiales. De la figura surgen dos posibilidades. La primera es que las macrófitas estén en este lugar, porque además del viento, el agua del río las haya llevado hasta este punto. Es decir, puede ser que cerca de esta zona se da el plunge point o punto de sumergencia entonces sean estos lugares hasta donde el agua empuja superficialmente. La otra posibilidad es que ante la presencia de la barrera, el agua pierda momentum y se hunda. Por otra parte, se observa que la temperatura y la conductividad al pasar el colchón de macrófitas se incrementan, contrario a lo que ocurre con la turbidez, que se reduce.

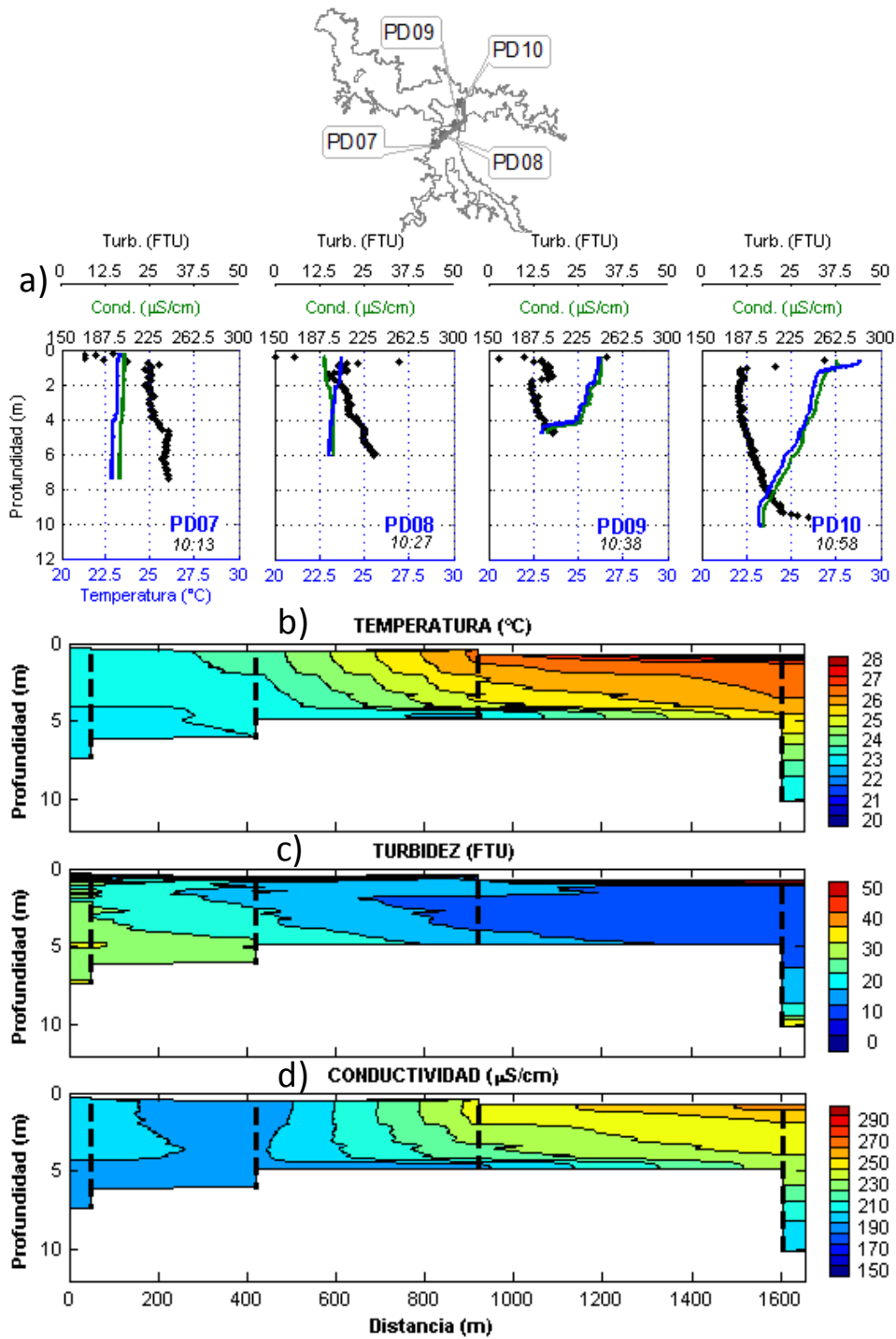


Figura 5-17: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal que atraviesa colchón de macrófitas el 16 de abril de 2010.

En la Figura 5-18 se muestra un transecto longitudinal que inicia en la estación PE01, entra al brazo la Cancana por su margen izquierda y sale hasta la estación PE07.

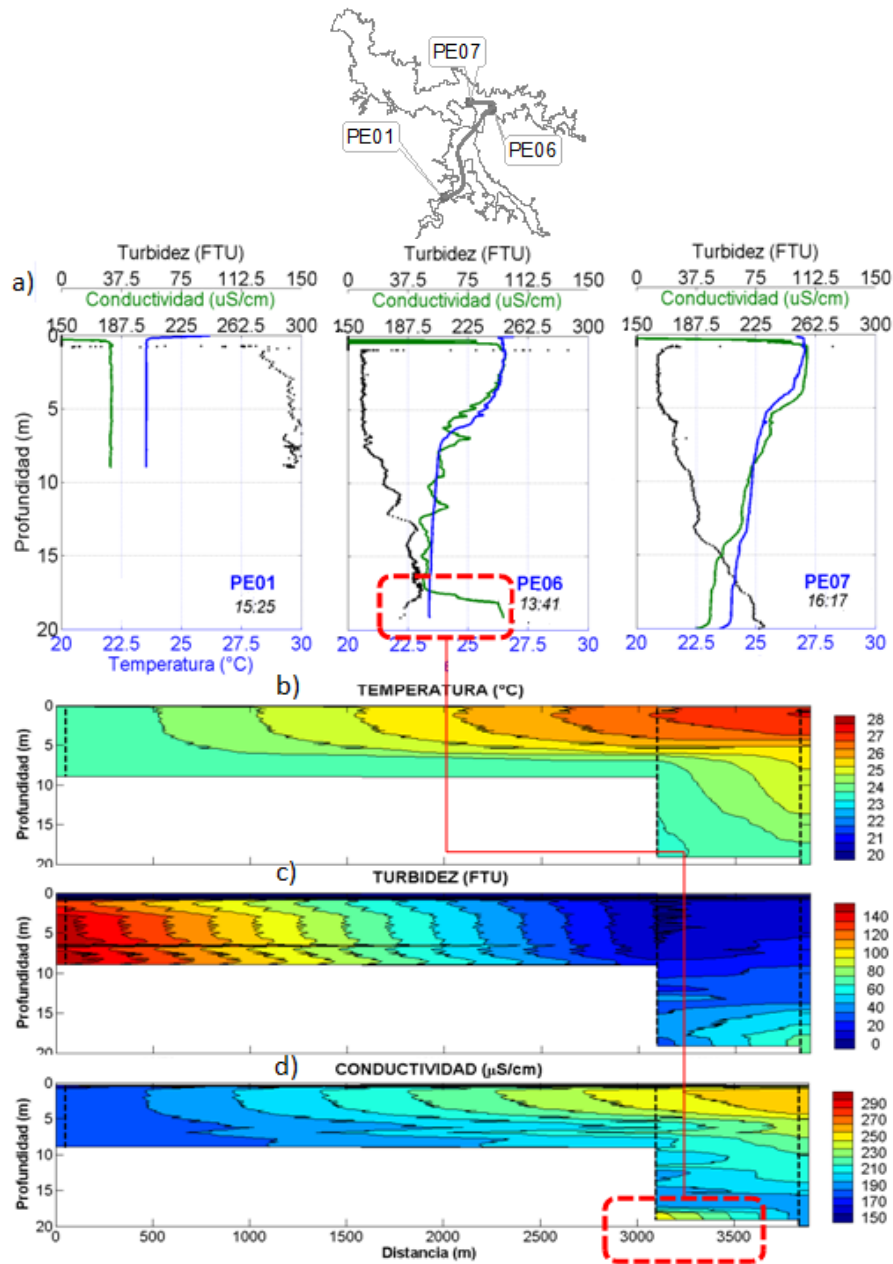


Figura 5-18: ubicación y perfiles (a), e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de abril de 2010.

En el recuadro rojo de la Figura 5-18 se recalca que hay una zona por debajo de los 17 metros de profundidad en la estación PE06 donde la conductividad es mayor que la

conductividad con la que entra el río Porce, registrada en la estación PE01 y mayor que la registrada en la estación PE07. Esto indicaría que, dado el momentum con el que llega el flujo a esta zona, su entrada al brazo La Cancana la hace por la margen derecha de éste. Es decir, la corriente principal del río golpea contra la margen norte del embalse, posteriormente mayor cantidad de agua sigue hacia la presa, el agua restante entra al brazo La Cancana. Esta hipótesis se reforzó con observaciones de la pluma del río Porce durante la tercera campaña, fecha en la que el nivel del embalse fue menor, el caudal mayor y se observaba la pluma en la superficie, como se indicará más adelante. Los perfiles en la estación PE07 desde aproximadamente los 14 metros de profundidad hasta el fondo se ven perturbados por la corriente principal del río Porce. Los perfiles en la estación PE06, entre los 8 y los 14 metros de profundidad parecen también afectados por la pluma del río Porce. En este caso, se diría que la pluma del río Porce entró al brazo La Cancana como una pluma intrusiva.

5.3.2 Segunda campaña

Esta campaña se hizo entre el 12 y el 16 de julio. Se hicieron pocos perfiles. Como se muestra en la Figura 5-9, tanto el caudal como el nivel se incrementaron con relación a la primera campaña.

En la Figura 5-19 se presenta un transecto longitudinal a través del cuerpo principal del embalse Porce II. La temperatura entre las estaciones PE08 y PE11 fue homogénea. Se dio una termoclina aproximadamente a los 4 metros de profundidad asociada a procesos superficiales. En los perfiles medidos en la estación PE08 se ve que los mayores valores de turbidez se dan en los diez últimos metros de profundidad, según esto, y a diferencia de la primera campaña, durante la segunda campaña al parecer la pluma del río Porce se desarrolla siempre como una pluma de fondo, es decir, no cambia a pluma intrusiva.

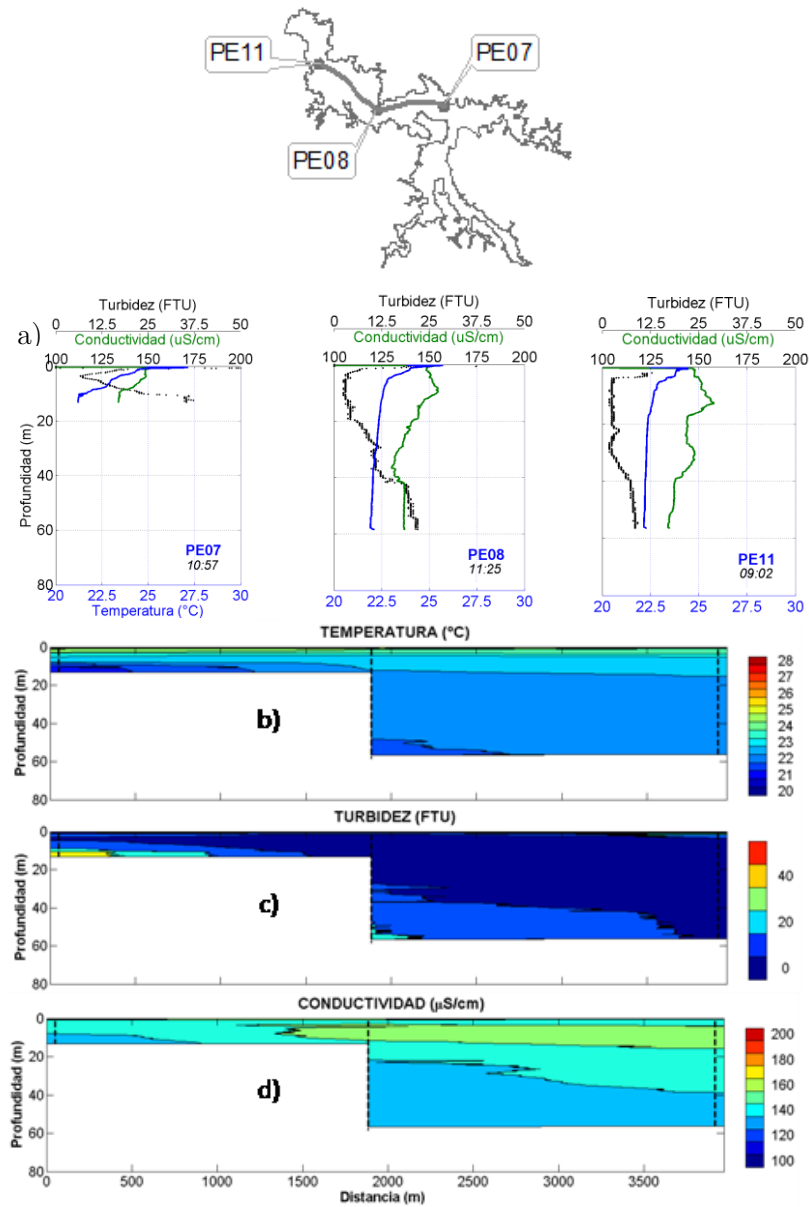


Figura 5-19: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de julio de 2010.

Igual que en la primera campaña, en la segunda campaña el río Porce entra al brazo La Cancana, pero esta vez como una pluma de fondo, no intrusiva como en la primera campaña. En la Figura 5-20 se muestra un transecto longitudinal que va desde la estación PE06 hasta la estación PE07, con una estación dinámica intermedia. En los perfiles de turbidez se ve que el agua más turbia viaja de fondo, además, que la turbidez de fondo es

menor en la estación PE06 y que se va incrementando hasta la estación PE07, indicando que la mayor parte del caudal del río Porce se va hacia la presa.

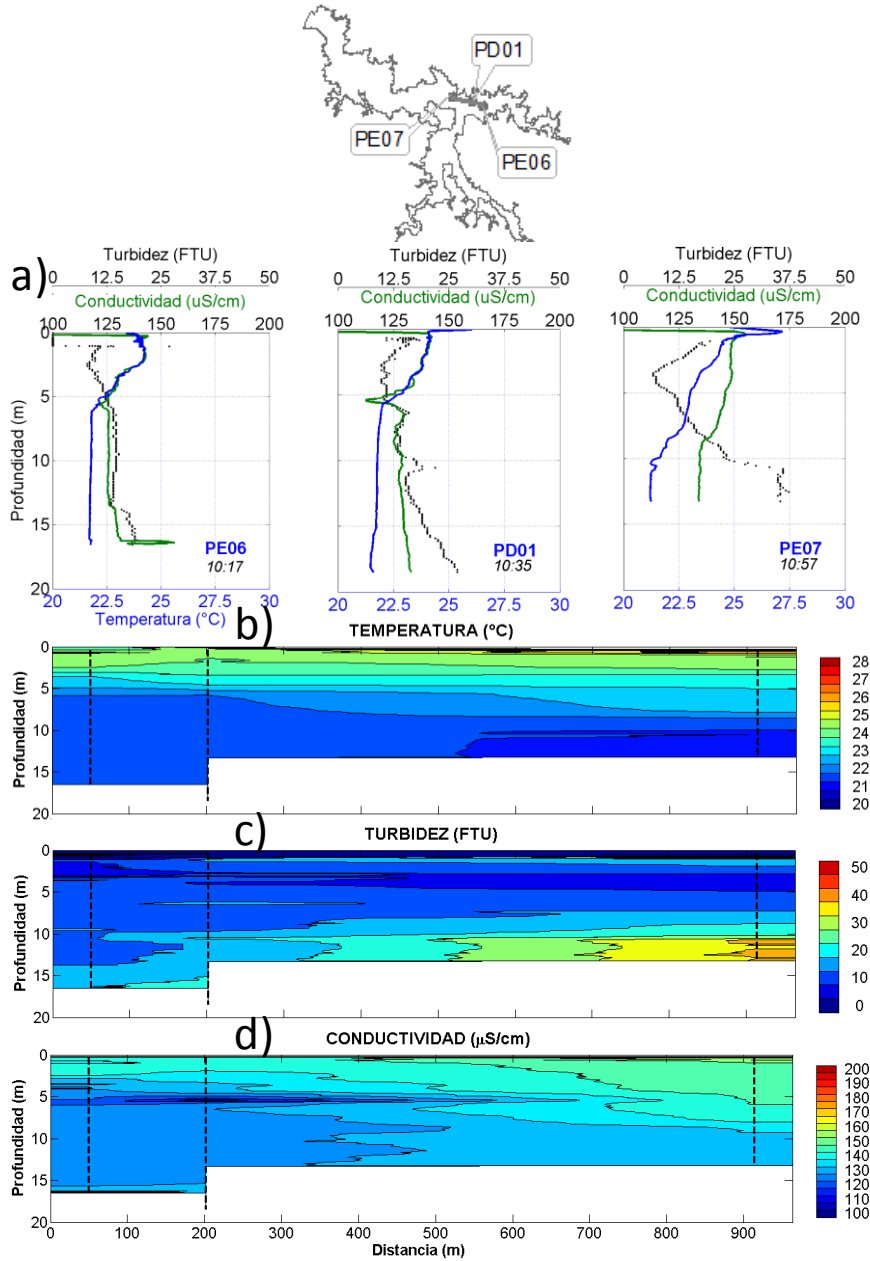


Figura 5-20: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 12 de julio de 2010 que sale del brazo La Cancana.

5.3.3 Tercera campaña de campo

Durante esta campaña se registró un caudal aproximadamente tres veces superior al de la primera campaña y nivel del agua más bajo entre las tres campañas. En las Figura 5-21 y Figura 5-22 se muestran dos transecto longitudinales, del 30 de noviembre y del 1 de diciembre, respectivamente. El rango de turbidez es diferente para los primeros tres perfiles en ambas figuras.

Siguiendo el panel de turbidez, en ambos transectos se observa una pluma que viaja de fondo hasta un poco después de la estación PE08. De allí en adelante se pensaría que la pluma viaja como intrusiva, pero no queda del todo claro, ya que también parece que se dividiera en dos plumas, una que continúa de fondo (panel a Figura 5-21, PE11) y otra intrusiva a 40 metros de profundidad. La pluma se hace casi imperceptible en la estación PE12. En estación, en el perfil de conductividad se observa una curva de reducción de la conductividad entre los 50 y 60 metros de profundidad. Es posible que ésta sea la ubicación preferente del agua que está llegando con la pluma. Si se mira el panel d, de la Figura 5-21 se cree, efectivamente que existe una pluma que viaja siempre de fondo y que avanza hasta chocar con la presa en la zona más profunda.

En el primer perfil del transecto del 30 de noviembre se registró una turbidez de 175 FTU aproximadamente, en el transecto del 1 de diciembre, aunque la turbidez llegó casi hasta 500 FTU, en ambos la turbidez registrada en la presa fue casi igual, de 20 FTU aproximadamente. Al parecer la turbidez, asociada a los sólidos que viajan con la pluma, se sedimentan en una zona entre la estación PE07 y PE08.

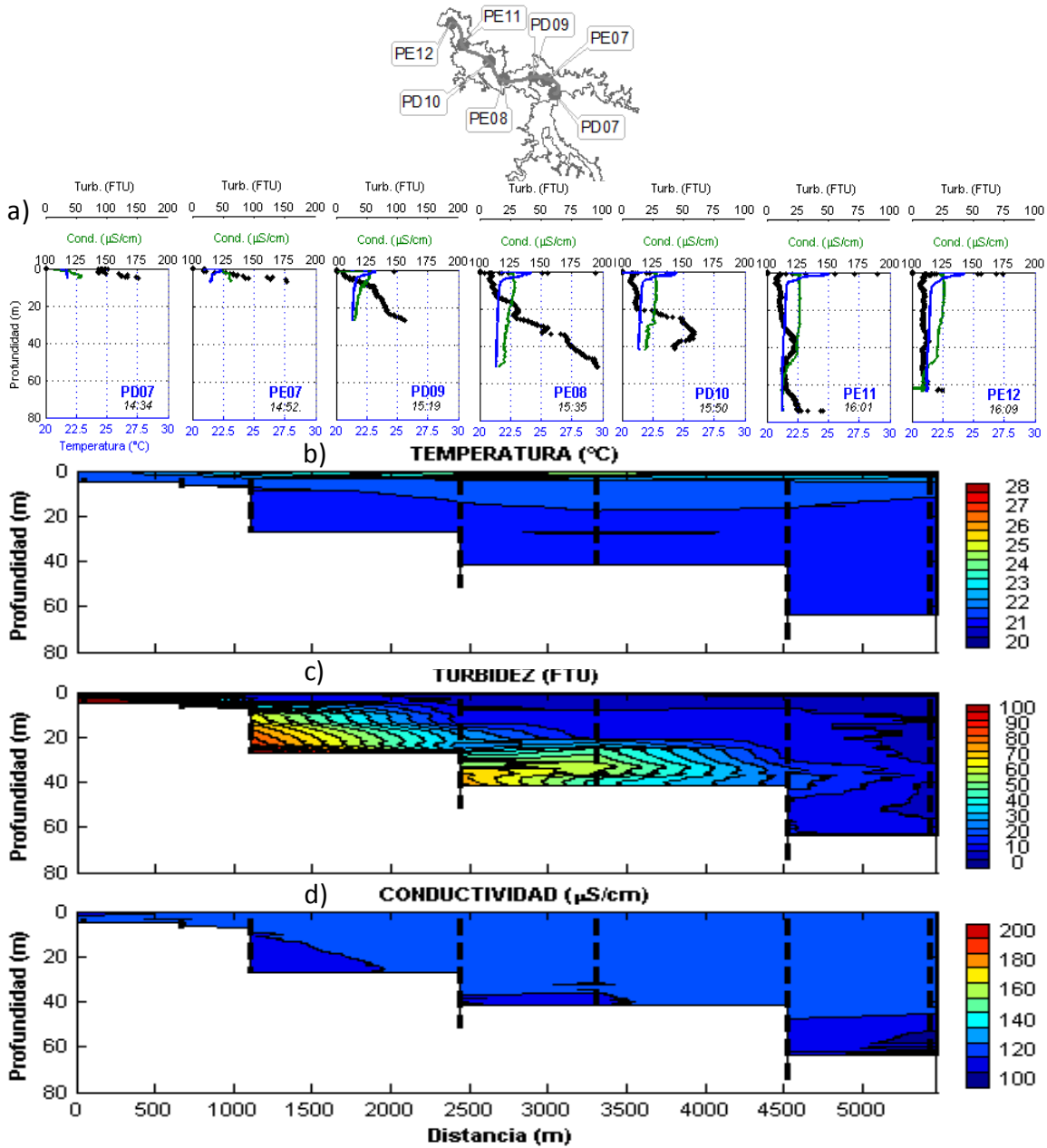


Figura 5-21: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 30 de noviembre de 2010.

La razón es que en ambos transectos, el de la Figura 5-21 y la Figura 5-22 la turbidez es casi igual en la estación PE08, sin importar la concentración registrada en la estación PE07.

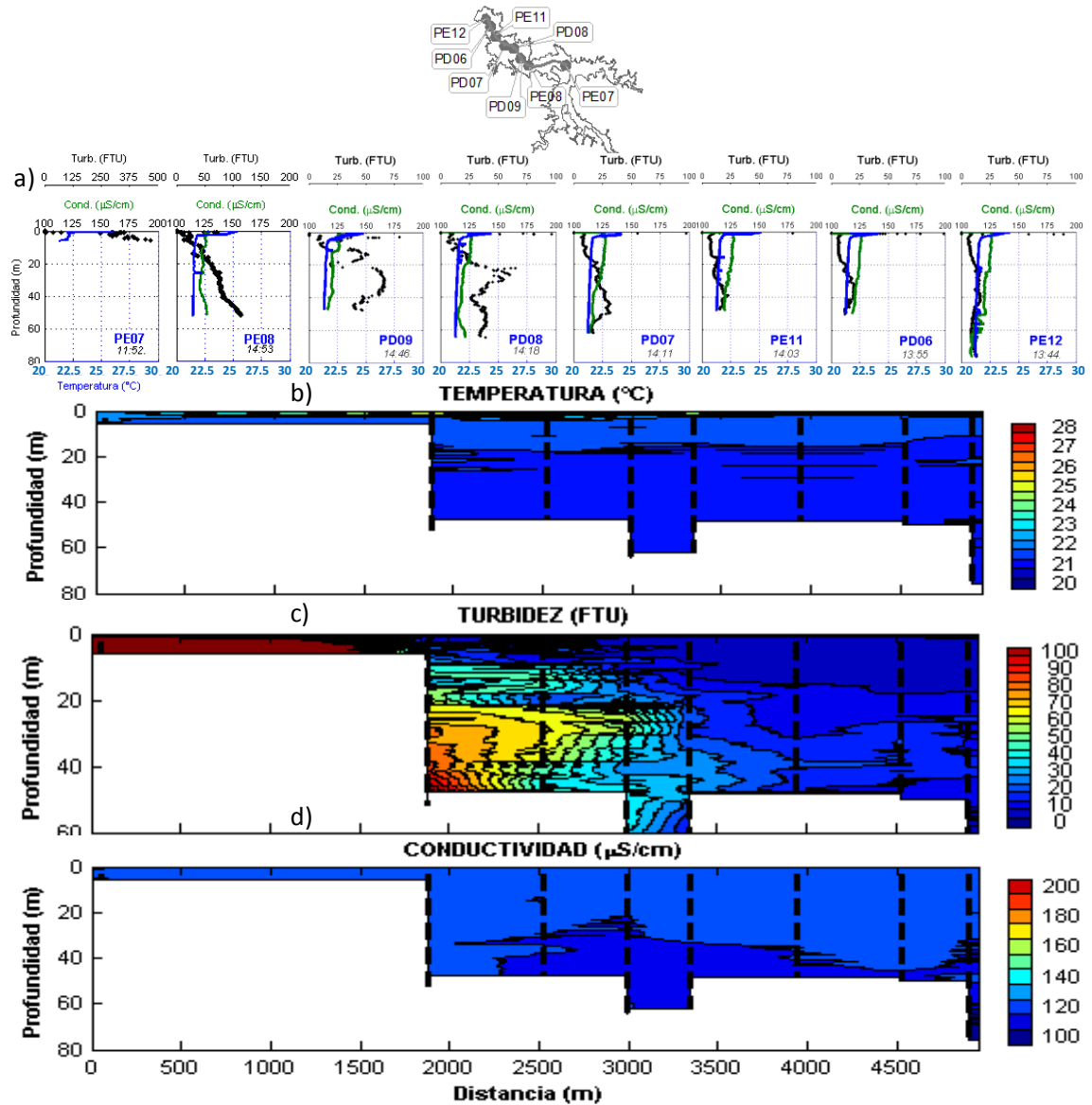


Figura 5-22: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 1 de diciembre de 2010.

Este resultado también se asocia con lo presentado en la Figura 5-29, donde se comparó la batimetría suministrada con las profundidades medidas con CTD, y se encontró diferencias hasta de 15 metros que indicaban procesos de sedimentación en esta zona. En la Figura 5-23 se presenta un transecto transversal que va desde la estación PE09 hasta la estación PE10.

El transecto se hace antes de la isla y se buscaba conocer cuál es el recorrido elegido por la corriente principal.

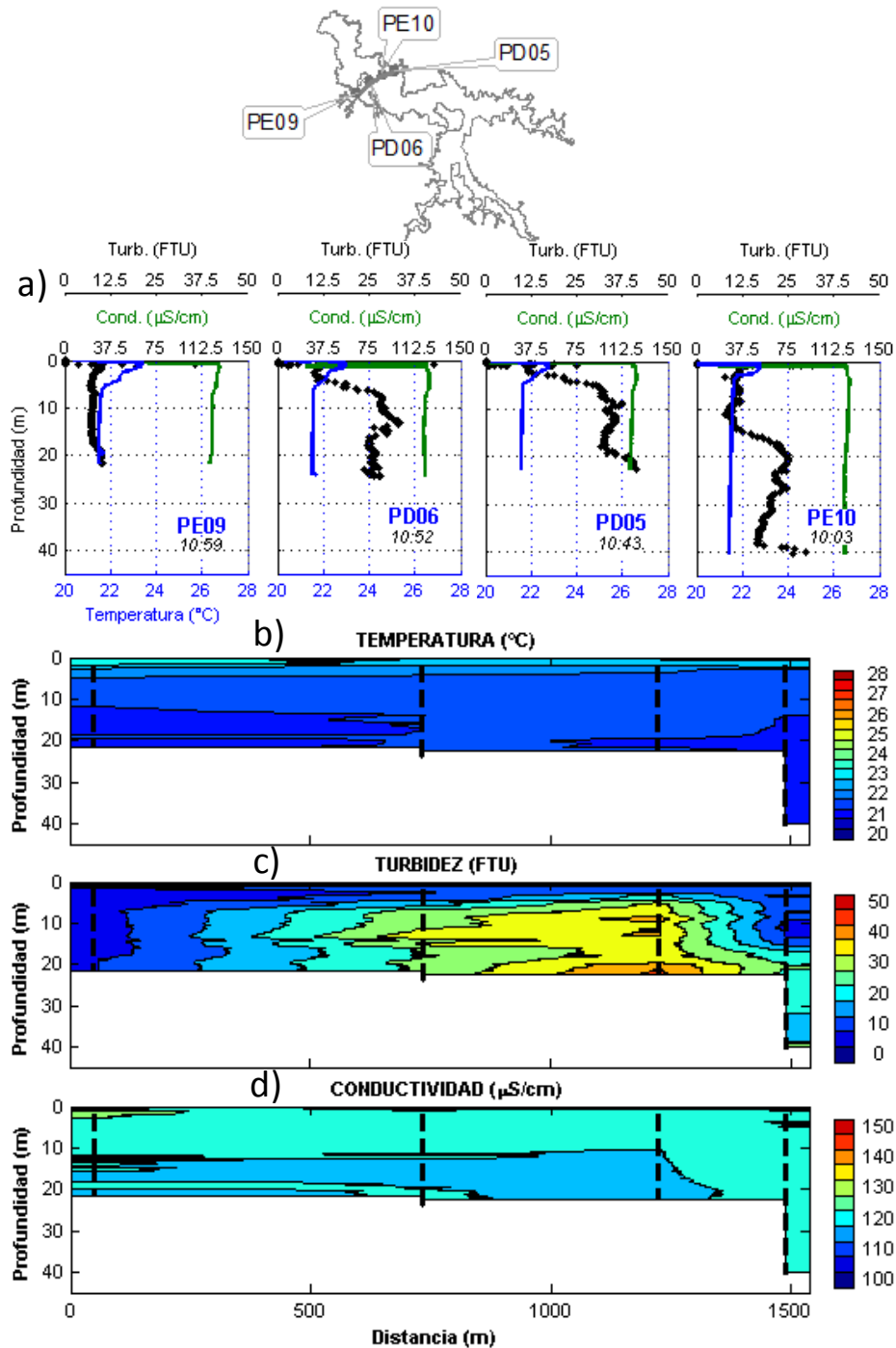


Figura 5-23: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto transversal el 3 de diciembre de 2010.

Como se observa, la pluma del río Porce viaja principalmente por el costado norte del embalse. Al igual que en los transectos longitudinales, en este transecto también se observa que la pluma está compuesta de dos frentes. Un frente que se intruye y otro que viaja de fondo. En los perfiles de temperatura se observa que se alcanzan mayores temperaturas en superficie en el costado sur que en el costado norte, por donde pasa la mayor parte del agua del río Porce.

En la Figura 5-24 se muestra un transecto longitudinal que entra al brazo Guaduas, este inicia en la corriente principal de río Porce, en el perfil PD10 y llega hasta la estación PE03. Más allá de esta estación no es posible acceder por la poca profundidad que generalmente se registra y por la presencia constante de macrófitas. Se ve una pluma intrusiva con un espesor de 5 metros aproximadamente que entra al brazo Guaduas entre los 5 y 10 metros de profundidad. Se observa además como la temperatura del río Porce afecta todo el brazo. La temperatura superficial cerca a la estación PE03 puede estar asociada a la presencia de macrófitas acuáticas en esa zona o también a la temperatura de entrada de la quebrada Guaduas. La conductividad deja dos rastros (Figura 5-24 panel c) que se asocian, el primero, que entra por el brazo, al río Porce. El segundo se asocia a la entrada de la quebrada Guaduas, que llega más cálida y, después de su paso por las macrófitas acuáticas, con mayor conductividad.

En la Figura 5-25 se presenta un transecto longitudinal que sale del brazo La Cancana y llega hasta un punto dinámico más allá de la estación PE07. La mancha de turbidez en el panel c se da porque la turbidez en la estación PE07 es de casi 500 FTU, como se observa en el panel a.

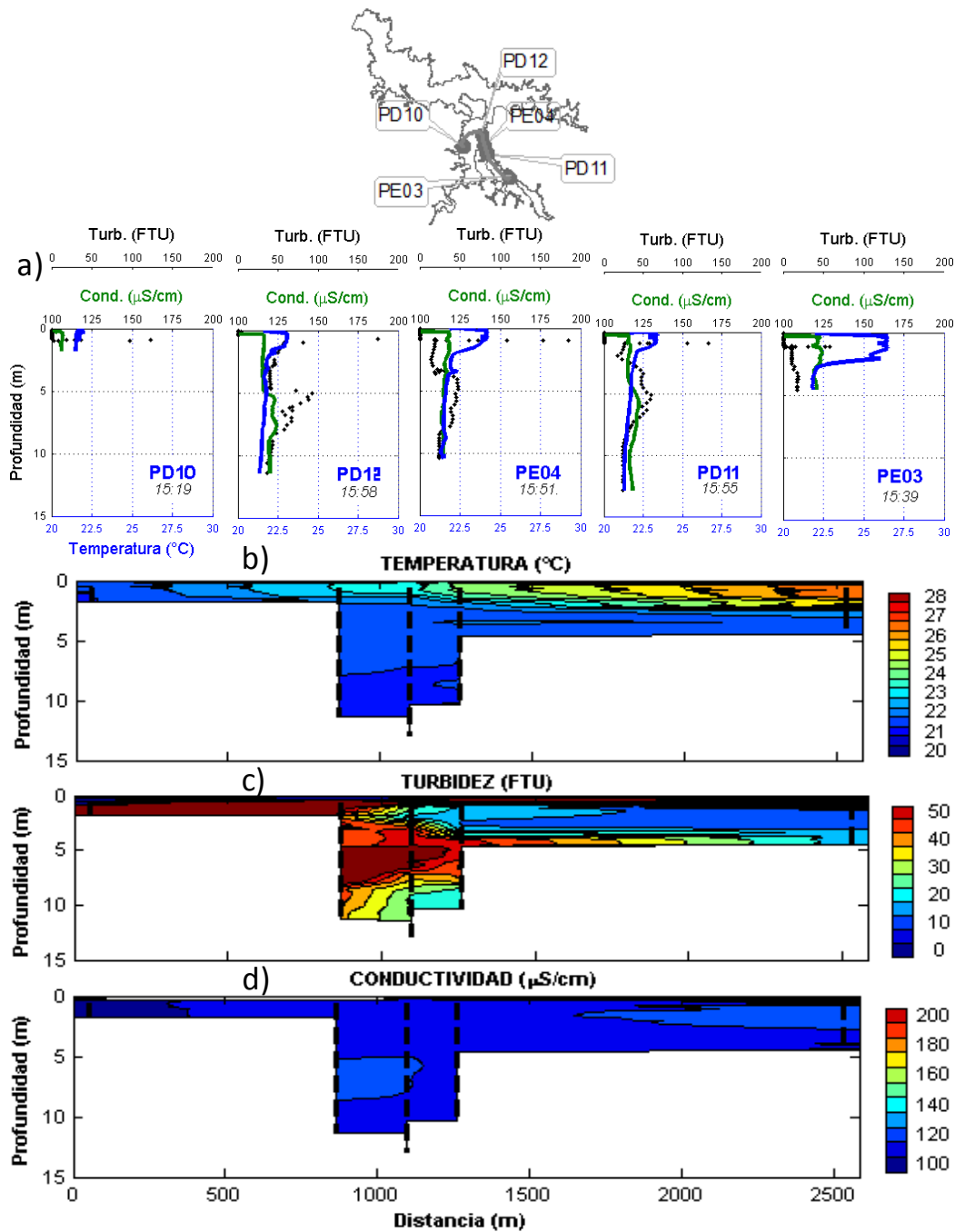


Figura 5-24: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 1 de diciembre de 2010 que entra al brazo Guaduas.

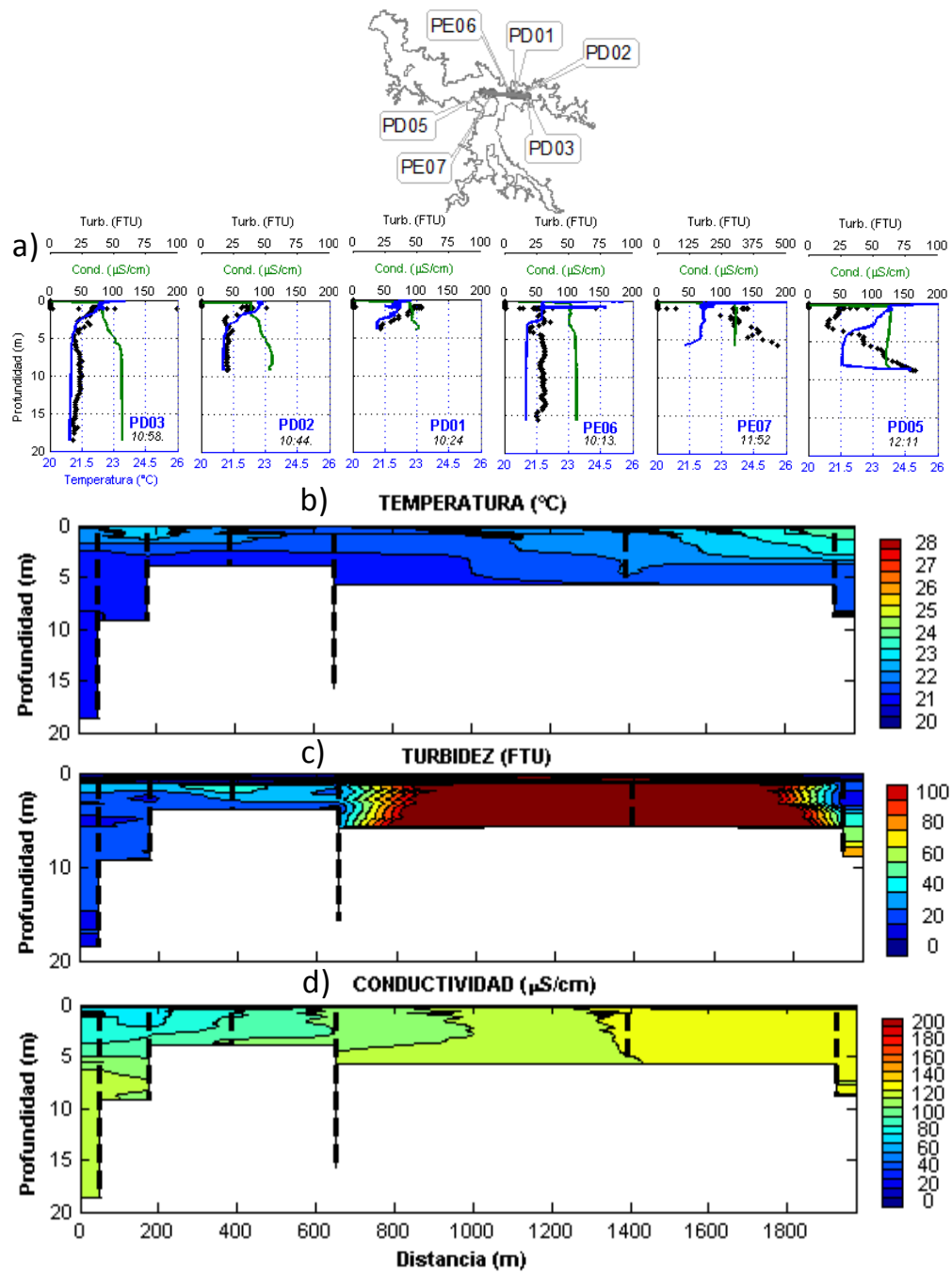


Figura 5-25: ubicación y perfiles (a) e interpolación espacial de (b) temperatura, (c) turbidez y (d) conductividad a lo largo de un transecto longitudinal el 1 de diciembre de 2010 que sale del brazo La Cancana.

En la Figura 5-25 no se observa claramente que el río Porce entre al brazo La Cancana. Durante la campaña de campo se observó que el caudal del río Porce avanza rápidamente

hasta chocar con la pared norte del embalse. La mayor parte del agua sigue el rumbo hacia la presa, pero parte del agua se desvía hacia el brazo La Cancana.

5.3.4 Posible explicación para la desaparición de la termoclina observada en la primera campaña a 40 metros de profundidad

A continuación se analiza el comportamiento del caudal del río Porce previo y durante las dos primeras campañas de campo. Se cree que este es el factor clave que explica las diferencias entre los perfiles de temperatura de estas campañas y por consiguiente, entre la primera y la tercera. En la Figura 5-26 se muestra la variación del caudal del río Porce y del nivel del embalse desde enero hasta julio de 2010. Como se observa, durante los tres primeros meses el caudal medio osciló cercano a $65 \text{ m}^3/\text{s}$. A principios de febrero el embalse tenía un nivel de aproximadamente 915 m.s.n.m. Éste fue incrementado en 15 días casi hasta la capacidad máxima del embalse, llegando a la cota 924 m.s.n.m aproximadamente. A partir de esto, el nivel del embalse fluctuó en general, por encima de los 920 m.s.n.m, manteniéndose un modo de operación básicamente constante hasta junio, mes donde se permite el llenado completo del embalse y se mantiene un nivel superior a 922 m.s.n.m. En abril se comenzaron a registrar incrementos importantes en el caudal del río Porce. Previo a la campaña de campo, un día antes, y durante la campaña, al embalse llegaron dos crecidas, con valores que superaron los $260 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como se presentó en la información de la primera campaña, esta agua llegó al embalse con aproximadamente $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura (valor registrado el 13 de abril). La temperatura de las zonas por debajo de los 40 metros de profundidad estuvo cercana o inferior a $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. El río Porce, antes y durante la primera campaña no tuvo ni el momentum ni el peso para mover el agua de estas zonas profundas, aunque se presentaron altos caudales. Como se mostró, durante la primera campaña la pluma del río en la zona profunda del cuerpo principal se propagó como una pluma intrusiva. A partir de mayo y antes de la segunda

campana, los caudales se incrementaron, se duplicó el caudal medio y fueron más frecuentes las crecidas, con repetidas avenidas superiores a $300 \text{ m}^3/\text{s}$ que duraron entre 6 y 12 horas, con picos de hasta $516 \text{ m}^3/\text{s}$.

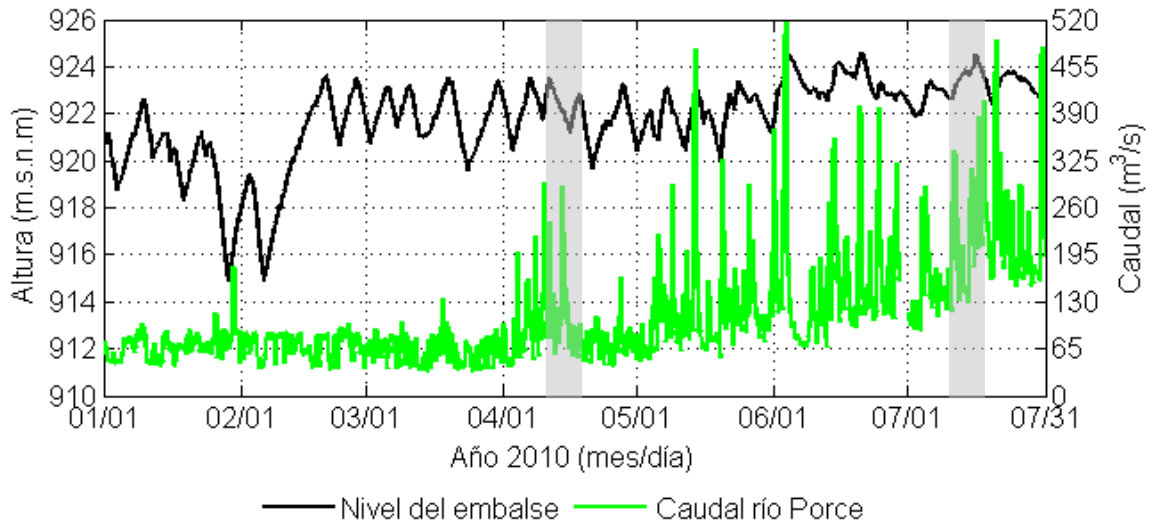


Figura 5-26: niveles del embalse Porce II y caudales del río Porce durante los primeros siete meses del 2010. Las franjas grises indican los momentos en los que se hicieron las campañas 1 y 2.

Durante la segunda campaña de campo la temperatura registrada en el río Porce, 3 kilómetros aguas arriba de su llegada al embalse el 13 de julio a las 14:00 horas fue de $21,2 \text{ }^\circ\text{C}$ y el 14 de julio a las 10:00, fue de $21,2 \text{ }^\circ\text{C}$, a las 13:00 fue de $21,8 \text{ }^\circ\text{C}$ y a las 17:00 de $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$, como se muestra en la Figura 5-9. Todas estas temperaturas inferiores a las registradas durante la primera campaña en las zonas profundas del embalse. Es decir, no se tiene prueba de qué ocurrió entre la primera y la segunda campaña de campo, pero hay dos hipótesis. La primera es que una de las borrascas registradas antes de la primera campaña haya tenido, como es de esperarse según la tendencia de temperaturas, una temperatura más baja que la registrada en la zona profunda, obligando que la pluma viaje de fondo, como se observó durante la segunda campaña, y renueve gran cantidad de agua del embalse, borrando la termoclina observada a los 40 metros de profundidad. Una segunda hipótesis, es que el río Porce fue reduciendo su temperatura, a su vez, la pluma intrusiva (como la que se

dio en la primera campaña) fue haciéndose cada vez más profunda, homogenizando el agua del embalse en la vertical, hasta volverse una pluma de fondo.

5.4 Procesos superficiales

Como se anotó en el marco teórico, en el trópico el balance de calor es determinado por el ciclo diario. Las capas superficiales se calientan durante el día y se enfrían durante la noche debido a la transferencia de calor de la atmósfera y a la mezcla temporal por el viento. En la Figura 5-27 se comparan los perfiles realizados en la estación PE08 con los perfiles de la estación PE12. Los perfiles se hicieron durante un nictemeral. La principal diferencia entre los perfiles es el campo de viento que actúa sobre ellos, ya que ambos están afectados básicamente por la misma radiación solar, y demás variables climáticas. Como se mostró en el análisis del campo de viento, en el embalse Porce II el viento se acopla a la orografía del embalse. En el panel a) de la Figura 5-27 se presenta la serie de viento registrada durante el nictemeral en la estación El Mango y en el recuadro rojo la magnitud y dirección del viento actuante durante la mayoría de los perfiles medidos. La dirección del viento que predominó fue de 220 grados azimutales y tuvo una velocidad promedio de 3 m/s, con valores superiores a 6 m/s. Esto quiere decir que durante la mayor parte del nictemeral el viento sopló hacia la isla y la magnitud del viento pudo haber sido mayor de 6 m/s, recordando que en esta dirección se encontró que se incrementa la velocidad del viento. Es decir, la superficie del agua fue empujada hacia el oriente, y por esta razón se presenta mayor mezcla en las capas superficiales de los perfiles medidos en la estación PE08 (ver recuadros rojos en la Figura 5-27 – panel b) que en las capa superficial de los perfiles en la estación PE12. Como se presentó en el marco teórico, el viento que actúa sobre la superficie del agua tiene tres efectos. El primero es un calentamiento diferencial, en el que las áreas afectadas por el viento se enfrían, el segundo efecto es una profundización diferencial, en el que aguas superficiales cálidas son llevadas a otras zonas, incrementando el espesor de las capas superficiales. Estos dos efectos se pueden observar en la Figura 5-27. En la zona

superficial de la estación PE12 la temperatura se va reduciendo, mientras que en la estación PE08 la temperatura se mantiene relativamente alta y el espesor de la capa superficial se incrementa. Consecuentemente, se esperaría una compensación gravitacional, que es el tercer efecto del viento, y se da cuando se presentan los dos anteriores.

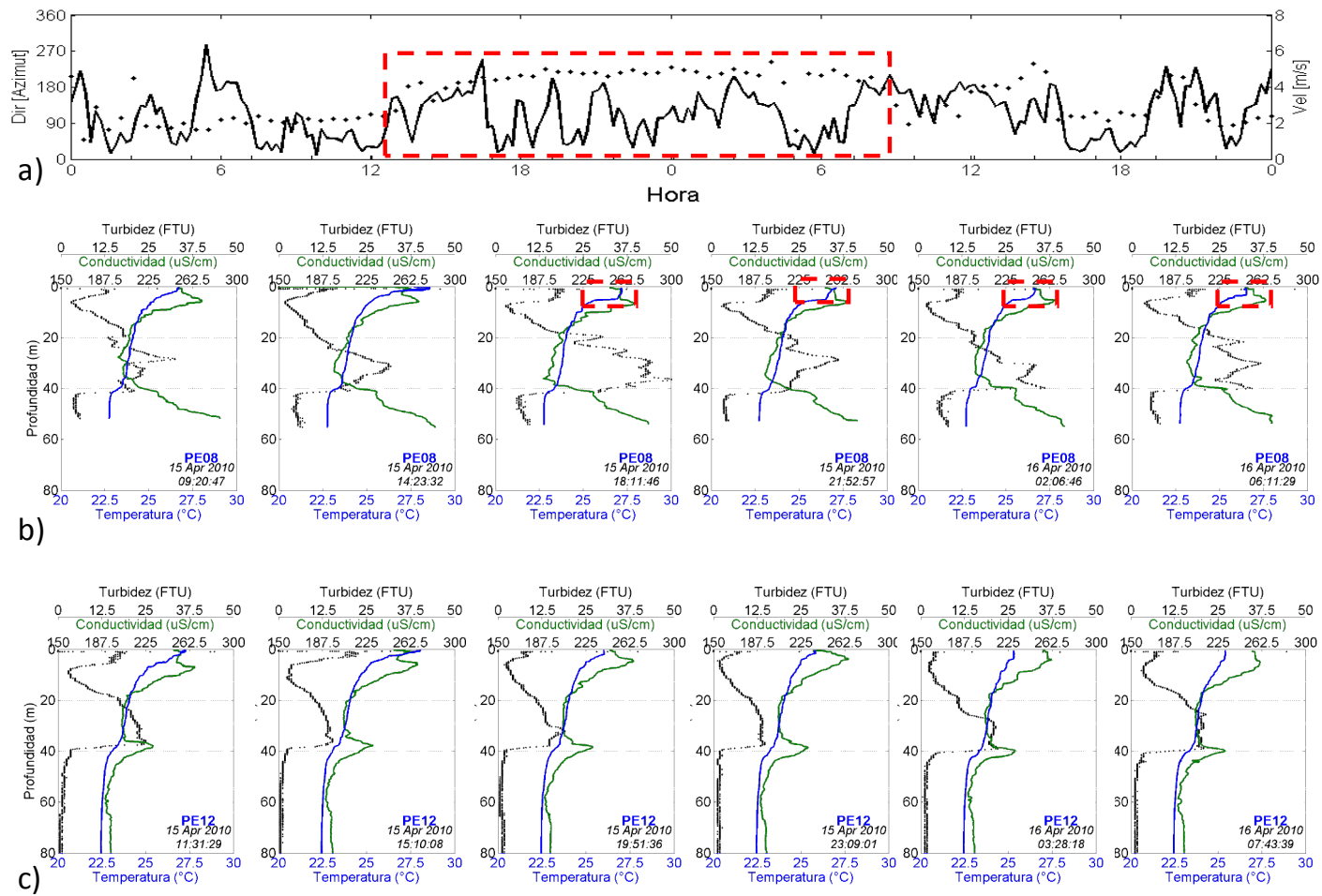


Figura 5-27: perfiles medidos durante 24 horas en las estaciones PE08 y PE12

5.5 Simulación numérica

5.5.1 Calibración del modelo

- Caudales de entrada y salida

Como se expuso en el capítulo de Datos y metodología, no se tiene información precisa de la cantidad de agua que entra y sale del embalse. Sumado a esto, la morfología del embalse ha cambiado sustancialmente con relación a la que se evalúa en este trabajo, lo que genera aún más incertidumbre en el balance de masa.

Durante las simulaciones el caudal del río Porce se incrementó en 5%, el caudal turbinado en 12% para rangos entre 100 y 160 m³/s, y cuando el caudal fuera superior a 200 m³/s se llevó a 225 m³/s.

En la calibración y validación del modelo se asumió un caudal constante para la quebrada Guaduas de 0,5 m³/s. Para la quebrada La Cancana se asumió un caudal constante durante la calibración de 2,5 m³/s y de 3,8 m³/s para la validación.

- Temperatura de los afluentes

La temperatura de entrada del río Porce para las simulaciones de calibración fue de 23,45 °C, registrada en la estación PE01 el 13 de abril. Para la quebrada Guaduas fue de 24,26 °C y para la quebrada La Cancana de 23 °C. Según las simulaciones, la temperatura del río Porce afectaría todas las zonas del cuerpo de agua. La temperatura del río Porce se mantuvo constante primero por la falta de información, y segundo porque se consideró, dados los análisis del comportamiento de la pluma, que la temperatura pudo no haber cambiado mucho previo y durante la campaña.

- Condiciones iniciales

Los cambios en las condiciones iniciales del modelo, como es de esperarse, repercutieron en los resultados de las simulaciones. Los principales contrastes en los resultados se obtuvieron al modificar la temperatura inicial de los perfiles por debajo de los 40 metros de

profundidad. Como se mostró en el análisis de la pluma, ésta es la zona más fría del embalse y con mayor tiempo de permanencia. Modificaciones de menos de 2 °C tuvieron incidencia en la localización de la segunda termoclina.

- Campo de viento y macrófitas

Con las simulaciones en las que se varió la magnitud del viento se observó, como se había concluido del análisis, que no todas las zonas deben tener la misma magnitud, que ésta depende de la dirección desde donde venga el viento y de la posición en el embalse. En la Figura 5-28 se muestra el campo de viento aplicado durante una simulación numérica. En él se puede observar cómo se reduce la magnitud del viento en los brazos Guaduas y La Cancana.

Al reducir la magnitud del viento en las zonas cubiertas por macrófitas se mejora en los resultados de las simulaciones, pero se entiende que el campo de viento que actúa sobre la superficie del agua, es decir, los esfuerzos, deben ser mejor determinados. Parte del análisis que se debe hacer es que las macrófitas, después de un tiempo de ser empujadas por el viento, inician un movimiento. Este movimiento afecta la mezcla en la superficie. A parte de esto, su movimiento no está libre, el desplazamiento de las macrófitas es controlado con barreras físicas como lazos flotantes, que impiden su paso al cuerpo principal, y por ellas mismas. Cuando el viento sopla hacia el oriente, las macrófitas se apiñan en los brazos Guaduas y La Cancana, pero cuando el viento sopla hacia el occidente, las macrófitas se liberan un poco y pueden divagar por el embalse hasta chocar con los lazos. El desplazamiento de las macrófitas fue evidente durante el trabajo de campo, pero no se tiene registro preciso de él.

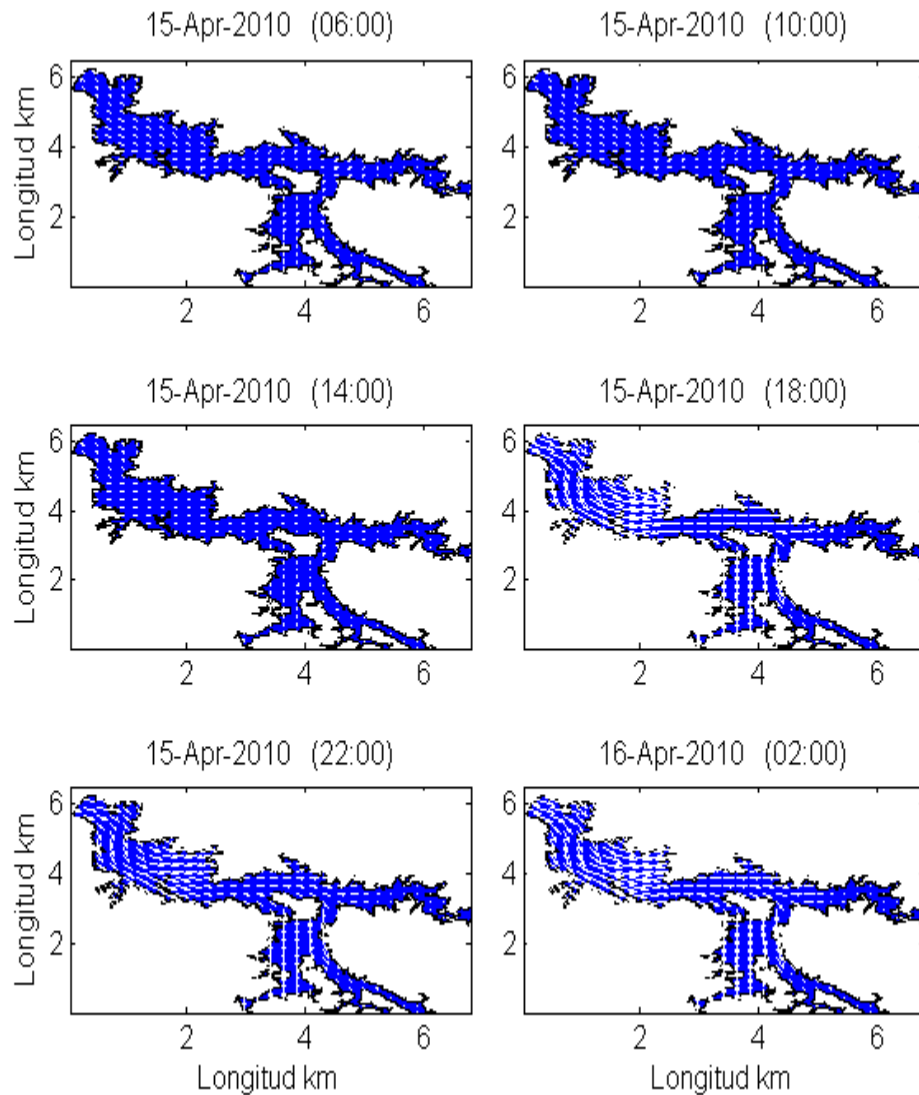


Figura 5-28: imagen del campo de viento aplicado para la calibración del modelo en seis momentos entre el 15 y el 16 de abril de 2010.

- Coeficiente de extinción de la luz

Los ejercicios de simulación en los que se variaron los coeficientes de extinción de la luz sirvieron como base para determinar con qué ecuación se trabajaría. Se observó que en ningún caso el coeficiente de extinción debería ser superior a 2. Este coeficiente, como se indicó, fue calculado con un valor de profundidad de disco Secchi promediado por zonas con diferentes ecuaciones. Finalmente se escogió la ecuación propuesta por Williams que es la que más se ajusta a los valores obtenidos durante la calibración. En la Tabla 5-3 se

presentan los promedios obtenidos con la ecuación elegida y la desviación estándar encontrada después de aplicar todas las ecuaciones referidas en el marco teórico, para cada una de las campañas de campo.

Tabla 5-3: coeficientes de extinción promediados por zonas calculados con la ecuación propuesta por Williams (1989)

Zonas	Coeficiente de extinción (m^{-1})					
	1era Campaña	Desviación estándar	2da Campaña	Desviación estándar	3ra Campaña	Desviación estándar
P	0,881	4,875			0,952	15,120
PG	0,796	2,437	0,833	3,192	0,952	15,120
G					0,861	4,032
C	0,746	1,799			0,866	4,228
ZA	0,810	2,683	0,796	2,444	0,765	2,003
ZM	0,791	2,356	0,740	1,467	0,708	1,467
ZB	0,769	2,061	0,719	1,553	0,735	1,694

En la Tabla 5-3 se puede ver la dificultad que se presenta al momento de elegir el coeficiente que se utilizará en las simulaciones. Como se indicó, las ecuaciones para determinar el coeficiente de extinción son obtenidas de ensayos particulares por lo que su aplicación no es generalizada.

- Radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y nubosidad

Los cambios en la ROC y la nubosidad en las zonas con presencia de buchón dieron resultados aceptables y notorios, mientras que los cambios realizados en los ciclos de temperatura ambiente y humedad relativa no fueron perceptibles. Se varió espacialmente la nubosidad y la radiación de onda corta. Finalmente, en las zonas con presencia de buchón la nubosidad se mantuvo en 80% durante toda la simulación y la ROC fue el 75% del valor registrado en El Mango. Para las demás zonas la nubosidad fue del 40% constante durante toda la simulación, excepto cuando se tiene registro.

- Sensibilidad a cambios en la batimetría

En la Figura 5-29 se muestran los cambios en la batimetría reportada entre 2004 y 2006 y la medida durante los tres muestreos en 2010. Con base en estos resultados se hicieron, como se indicó, dos simulaciones. La única diferencia entre las simulaciones fue la malla de cálculo. Luego de comparar los resultados se encontró que en la mayoría de las estaciones la diferencia en temperatura fue de 0,1 °C, excepto en la estación PE06. Esta zona fue difícil de calibrar en superficie probablemente por la presencia constante de macrófitas y en el fondo por las diferencias en la batimetría.

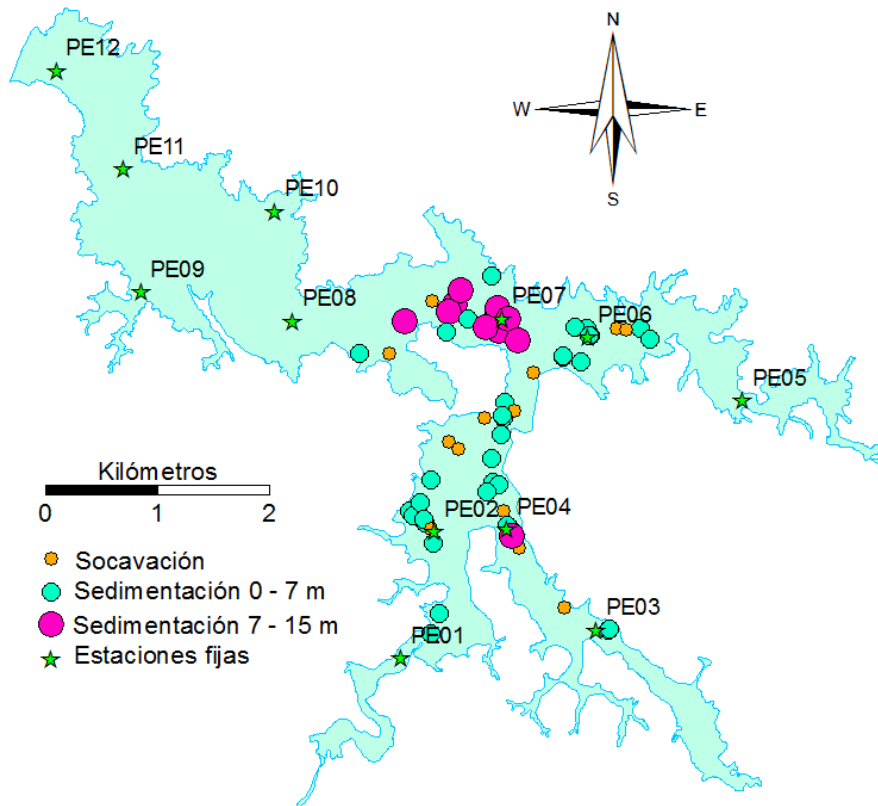


Figura 5-29: comparación entre profundidades medidas con CTD y profundidades de batimetría utilizada en las simulaciones

En la Figura 5-30 se ve la incidencia de la batimetría en el perfil.

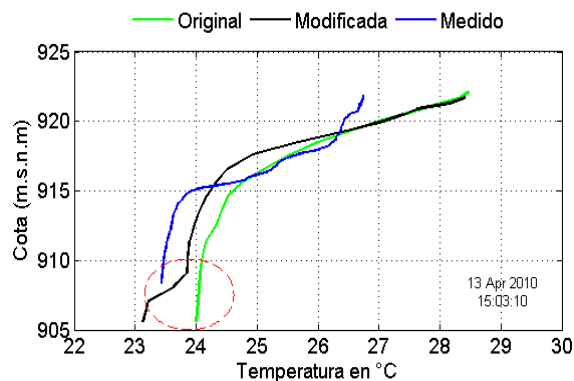


Figura 5-30: comparación de perfiles generados a partir de diferentes mallas de cálculo y el perfil medido en PE06.

Por último, en la Figura 5-31 se presentan los perfiles evaluados de la simulación definitiva durante el proceso de calibración. En ella se aplicaron todas las condiciones y forzantes externos antes comentados.

En general, los resultados de la calibración son aceptables. El modelo reproduce bien la temperatura en el cuerpo principal. Los perfiles en zonas con buchón o cercanos a ellas fueron difíciles de calibrar en superficie. Se debe tener en cuenta que la temperatura del río Porce no fue rigurosamente registrada, y que las simulaciones que mejores resultados dieron fueron las que se hicieron con una temperatura constante de 23,45 °C, situación que no se presenta.

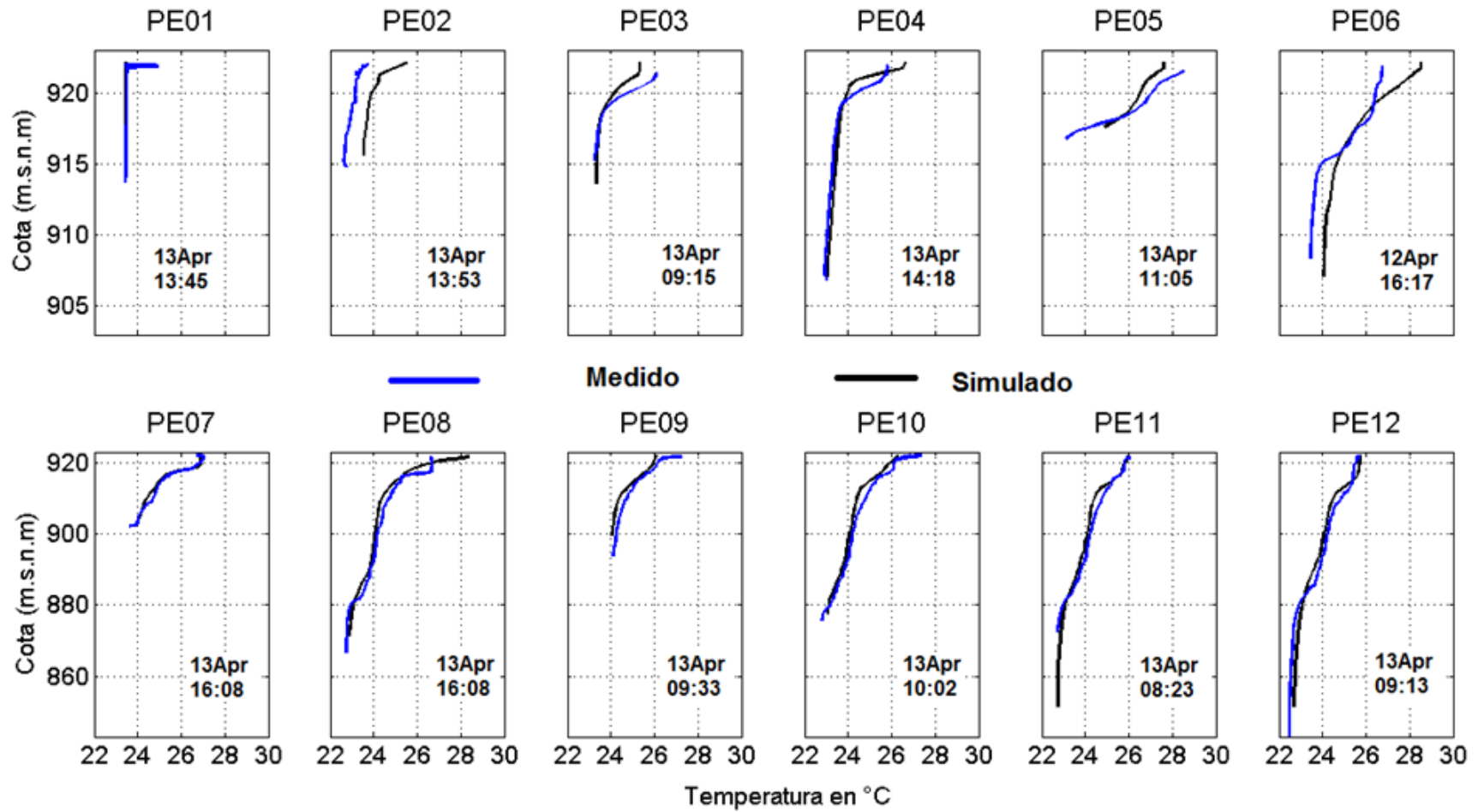


Figura 5-31: Simulación definitiva en el proceso de calibración

5.5.2 Validación del modelo

En la Figura 5-32 se muestran los niveles simulado y medido durante la simulación con datos de la tercera campaña ajustados como se indicó en la calibración.

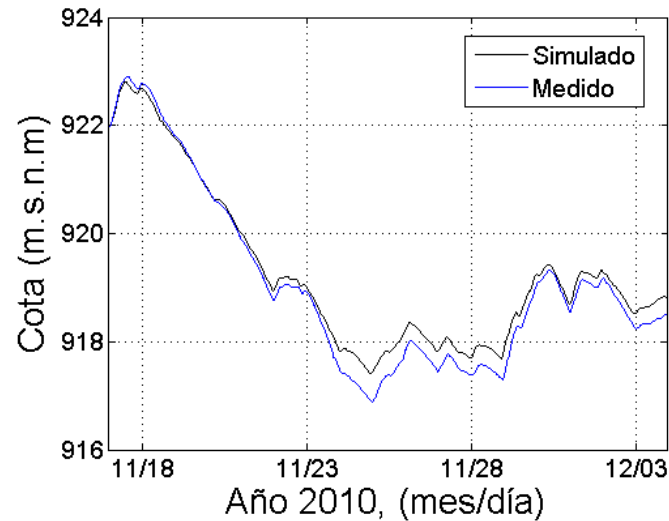


Figura 5-32: diferencias entre el nivel simulado y el nivel medido para la tercera campaña, validación.

Durante la tercera campaña, como se indicó, se puso un termistor en el río Porce, cerca a la estación El Diamante. En la Figura 5-33 se presenta la validación del modelo utilizando dos simulaciones, una con el ciclo de temperatura medido en el río Porce y otra con su promedio. Con la comparación se pretende mostrar la importancia y sensibilidad que tiene el ciclo de temperatura del río Porce en todo el embalse.

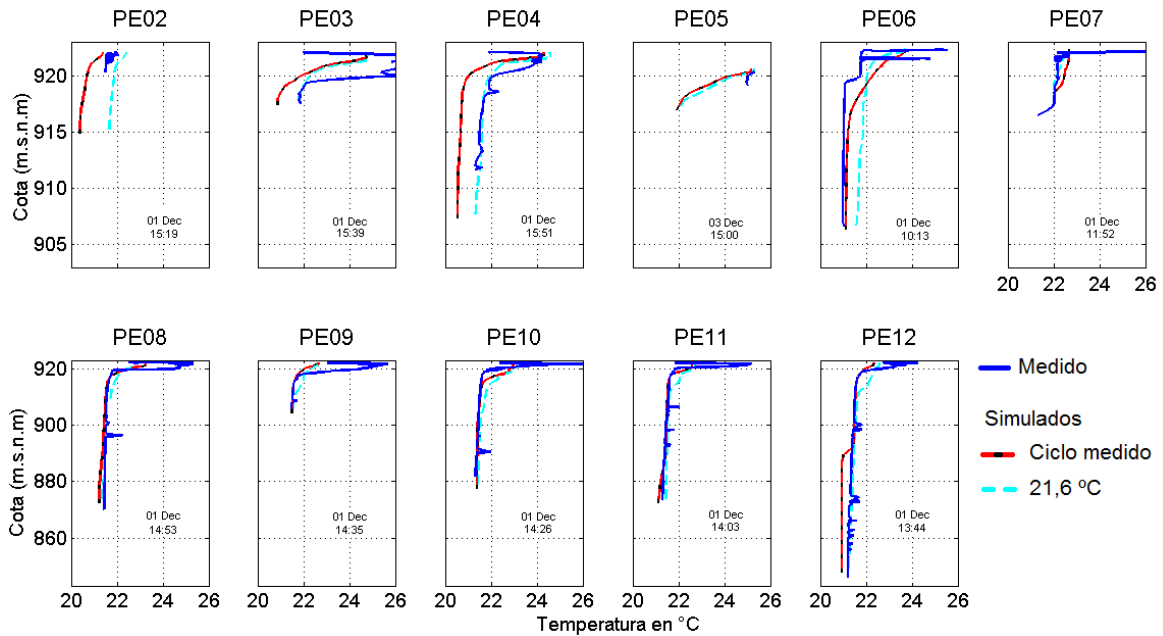


Figura 5-33: perfiles de temperatura simulados y medidos durante el proceso de validación.

El ciclo de temperatura del río Porce con el que se validó genera algunas dudas al momento de su aplicación . Primero porque se registró 9 km aguas arriba de la llegada del río al embalse y segundo porque la temperatura se incrementó notablemente en momentos donde el nivel del río Porce se redujo.

El caudal registrado, igualmente 9 km aguas arriba, durante la campaña y una semana antes tuvo picos de más de 325 m³/s. En promedio esperaríamos que el río recorriera los 9 km en aproximadamente 90 minutos. El 30 de noviembre entre las 9:15 y las 9:30 horas se registraron temperaturas en el termistor entre 20 y 20,1 °C. Cerca de 90 minutos después, a las 11:00 horas en la estación PE01, se registró una temperatura de 20,5 °C, o sea 0,4 °C más que las temperaturas registradas 9 km aguas arriba. El primero de diciembre a las 13:15 horas se registró en la estación PE02 una temperatura promedio de 21,5 °C, mientras que 9 km aguas arriba, el ciclo de temperatura registraba las temperaturas presentadas en la Figura 5-9.

Tabla 5-4. Variación de la temperatura del río Porce registrada con termistor en cuatro horas durante el primero de diciembre de 2010.

Hora de medición	Tiempo antes respecto a la medición en PE02 (horas)	Temperatura °C
11:15	2	22.66
11:45	1,5	23.71
12:15	1	25.35
12:45	0,5	24.85

Las diferencias en la temperatura medida en la estación PE02 y las temperaturas observadas en la Tabla 5-4 son altas, de más de 1°C. Como se observa en la Figura 5-9 en el momento de las mediciones presentadas en la Tabla 5-4 el caudal se redujo y es de esperarse que el nivel de la lámina de agua también, y que el termistor haya quedado más superficial. Durante la campaña de calibración la sensibilidad a la temperatura del río Porce no fue tan alta como en la tercera, posiblemente porque el agua del río no incidía tan rápidamente ni tanto espacialmente como lo hace durante esta campaña.

Esto plantea además la necesidad de mejorar el registro de temperatura del río, poniendo termistores en un lugar más cerca de la llegada al embalse.

Por esto se simuló con el ciclo de temperatura registrado y con un valor promedio obtenido de este ciclo. En la Figura 5-33 se observan que ambas simulaciones, la que tiene el ciclo y la que tiene el valor constante representan bien algunos perfiles y en algunas profundidades.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

6.1.1 Campo de viento

La idea de que el campo de viento en el embalse Porce II se acopla a la topografía quedó resuelta con las comparaciones entre la estación El Mango y las estaciones flotantes. De estas comparaciones se puede asegurar que a partir de los registros de la estación El Mango es posible aproximarse al campo de viento en todo el embalse Porce II.

Si en la estación El Mango se registran velocidades de más de 2 m/s y el viento baja por el cañón se espera que la mayor velocidad sea la registrada en la presa, pero si el viento asciende por el cañón, se espera que las mayores velocidades se den en la zona alta (ZA) del cuerpo principal. La mayor parte del tiempo, el viento asciende por el cañón.

La metodología aplicada para determinar el campo de viento pareció ser la adecuada, ya que después de evaluar su efecto en las capas superficiales del agua con ELCOM, los resultados fueron buenos. Las temperaturas superficiales fueron bien simuladas en varias zonas, sobretodo en el cuerpo principal, pero existen dificultades en la aplicación del campo de viento en áreas con presencia de macrófitas acuáticas.

6.1.2 Pluma de entrada del río Porce

En todas las campañas de campo la pluma del río Porce entró al embalse como una corriente de fondo. La turbidez sirvió como trazador. Con ella se pudo identificar el movimiento de la pluma en las zonas evaluadas.

Durante la primera campaña, la corriente principal o pluma del río Porce viaja como una pluma de fondo hasta un punto entre la estación PE07 y la estación PE08, luego se propaga como una pluma intrusiva con un espesor aproximado de 20 metros, entre 20 y 40 metros de profundidad hasta la presa. En la segunda campaña la información de campo fue menor, sin embargo se cree que la pluma se propagó siempre de fondo. En la tercera campaña la pluma se mueve como una pluma de fondo hasta pasar por la estación PE08; aguas abajo de esta estación la pluma parece dividirse en dos, una parte que continúa de fondo y otra que pasa a ser intrusiva.

Según el comportamiento de la pluma del río Porce durante la primera campaña se espera que el agua captada haya tenido características muy similares a las de la pluma del río Porce registradas en la estación estática PE12. Para la segunda y la tercera campaña las evidencias muestran que la pluma llega a la estación PE12 como una pluma de fondo, que posiblemente se sitúa en la zona más profunda cerca a la presa. Según la tendencia de la temperatura del río Porce a bajar, se esperaría que a medida que llega más agua a la zona de presa, ésta desplace hacia arriba el agua que estaba ahí y esta vaya siendo extraída por la captación, así que lo que se capta ha permanecido más en el embalse que cuando la pluma llega directamente a la captación.

En las tres campañas la turbidez que llegó a la estación PE12 no superó las 30 FTU, aunque hubo valores de turbidez de hasta 500 FTU en PE01.

En la tercera campaña se evidenció la entrada del río Porce al brazo Guaduas hasta la estación PE03. También se observó en la parte alta del brazo agua superficial con mayor temperatura y conductividad que se asoció al agua de la quebrada Guaduas. Es muy probable que el río Porce llegue a las partes altas tanto del brazo Guaduas como del brazo La Cancana, como se observó durante la tercera campaña, pero esto no se pudo verificar en las campañas precedentes.

La entrada del río Porce al brazo La Cancana se vio durante las tres campañas de campo. En la primera campaña entró como una pluma intrusiva, en las dos siguientes campañas lo

hizo como una pluma de fondo. Durante la primera campaña, las quebradas Guaduas y La Cancana entraron al embalse como plumas de fondo. Durante la tercera campaña la quebrada Guaduas entró como una pluma superficial.

Aunque el embalse Porce II es pequeño y los efectos de la turbinación y el vertimiento repercuten rápidamente en el nivel del embalse, las características de la estructura térmica y de la calidad del agua están determinadas por las variaciones climatológicas de la cuenca del río Porce, es decir, sin importar el modo de operación, la calidad del agua y la estructura térmica estarán determinadas por las variaciones del caudal y la temperatura del río principal.

El cambio en el perfil de temperatura observado durante la primera campaña y las dos siguientes, que pasó de tener dos termoclinas a tener una sola termoclina en superficie, respectivamente, se debe a las variaciones significativas en el régimen de lluvias que se presentó en la cuenca del río Porce. Durante la primera campaña y previo a ella, el embalse se mantuvo relativamente constante y es posible que el comportamiento de la pluma del río Porce siempre haya viajado como una pluma intrusiva. A partir de mayo y antes de la segunda campaña, los caudales se incrementaron, se duplicó el caudal medio y fueron más frecuentes las crecidas, con repetidas avenidas superiores a $300 \text{ m}^3/\text{s}$ que duraron entre 6 y 12 horas, con picos de hasta $516 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta situación, asociada a la reducción en la temperatura pudo haber desplazado y reemplazado el agua de fondo del embalse y de esta manera haberlo homogenizado, como se observó.

6.1.3 Procesos superficiales y generalidades

En el embalse Porce II el viento es capaz de generar capas de mezcla de hasta 4 metros de profundidad, como las que se presentaron en el nictemeral de la primera campaña. Estas capas se deben a procesos asociados al viento como el calentamiento diferencial, mezcla y procesos de desplazamiento y acumulación de agua más cálida en algunas zonas del embalse. En otras palabras, lo que ocurrió en el embalse durante el nictemeral, y posiblemente lo que

ocurre reiteradamente, ya que el patrón de viento es repetitivo, es que agua superficial cercana a la presa, que estuvo sometida a la radiación solar durante todo el día, fue transportada y acumulada hacia la zona alta del cuerpo principal. Con este desplazamiento se modifica su tiempo de permanencia en el embalse y se activan los intercambios de masa entre las diferentes zonas. Como lo reportan Rueda et al (Rueda et al. 2005), variaciones en el campo de viento afectan los tiempos de residencia significativamente.

En general se observó homogeneidad transversal en la temperatura y un aumento longitudinal de la temperatura desde la zona de entrada del río Porce hasta la zona alta del cuerpo principal. Las mayores temperaturas superficiales se presentaron entre las 12:00 y las 16:00 horas. Las dos termoclinas observadas durante la primera campaña obedecen, la primera a los forzantes superficiales, y la segunda termoclina, a la diferencia en temperatura entre el agua más profunda, por debajo de los 40 metros, y la temperatura de la pluma del río Porce.

En la primera campaña, la diferencia entre la temperatura de fondo y la temperatura superficial fue de 4,5 °C y durante la segunda y la tercera campaña fue inferior a 3,5 °C.

6.1.4 Simulación numérica

La malla de 75 x 75 metros es una malla ágil, pero dadas las facilidades computacionales se puede pasar a una malla más refinada que capture mejor las variaciones morfológicas del embalse.

Aunque los resultados de la calibración son buenos, se observan deficiencias en algunas zonas con presencia de macrófitas. En los flujos superficiales falta mejorar el campo de viento buscando representar mejor la presencia de estas plantas flotantes. Hasta el momento lo que se hizo fue reducir a cero la magnitud del viento en las áreas cubiertas por macrófitas y disminuir su intensidad de acuerdo a la cercanía. Este es un primer paso, falta considerar el desplazamiento de las macrófitas. Como se explicó, el movimiento de las macrófitas inicia

posterior al inicio del viento que actúa sobre ellas y la duración de este movimiento está restringida por las diferentes barreras que hay en el embalse.

En la comparación entre el espesor de la pluma observado en los datos de la primera campaña en las estaciones PE08 y PE12 y lo simulado durante la calibración, el modelo se acercó al espesor de la pluma del río Porce, pero no representó del todo bien su profundidad. Como se indicó, si las temperaturas del río Porce no son rigurosamente registradas e introducidas al modelo, es difícil que éste represente el comportamiento del río dentro del embalse con mayor exactitud.

El modelo capturó las dos termoclinas que se presentaron en la primera campaña en todas las estaciones que superaron los 40 metros de profundidad. Las zonas afectadas por la presencia de macrófitas no se pudieron simular adecuadamente. Para obtener buenos resultados con ELCOM en el embalse Porce II es necesario actualizar la batimetría, tener un registro continuo de la temperatura del río Porce y evaluar conjuntamente el campo de viento con el movimiento de las macrófitas acuáticas.

Durante la primera campaña se evaluó la semana del 12 al 16 de abril. En el proceso de calibración del modelo se encontró que el tiempo de viaje desde la estación PE01 hasta la estación PE08 fue de alrededor de 5,7 días, y que desde PE01 hasta PE12 fue de 7,0 días. Es decir, los perfiles de temperatura medidos durante la semana del muestreo probablemente fueron afectados por agua que entró al embalse aproximadamente 7 días antes. Este tiempo, junto con el tiempo de calentamiento del modelo se debe considerar al momento de preparar las simulaciones y analizar sus resultados.

Además de esto, también se abre paso a una discusión sobre los resultados de las simulaciones. Las simulaciones para la calibración dieron mejor resultado cuando se utilizó la temperatura registrada en la estación PE01. Sin embargo, a la luz de esta información y como se había pensado al inicio de las simulaciones, es probable que los resultados de la calibración sean buenos porque las condiciones generales del viaje de la pluma durante la primera campaña y días previos a ella se mantuvo relativamente constante y no se

esperaban cambios significativos en la temperatura de entrada del río Porce. Si las condiciones previas a la campaña, hubieran sido muy diferentes, simular con la temperatura registrada en perfiles cercanos a la llegada del río seguramente no daría buenos resultados, porque el agua que estaría en el embalse habría entrado días antes con una temperatura muy diferente.

6.2 Recomendaciones

Para comprender la hidrodinámica del embalse Porce II, y posteriormente comprender procesos fisicoquímicos y biológicos es necesario estudiar el efecto del viento conjunto con las macrófitas acuáticas.

Dado que la hidrodinámica del embalse es tan sensible a la temperatura y al caudal del río Porce se recomienda poner una estación de medición de caudal y temperatura en la entrada al embalse. Esta estación debería aprovecharse también para instalar medidor de sedimentos.

Se recomienda llevar registros de los caudales vertidos y turbinados rigurosamente, así como del movimiento de las compuertas radiales.

Al momento de instalar los equipos en el embalse, previo a las campañas de campo, se recomienda hacer unos perfiles con CTD que permitan conocer el estado del embalse previo a la campaña. Como se indicó, las cadenas de termistores se instalan antes, pero su información sería mucho más acertada si se conoce de ante mano cómo está entrando la pluma al embalse.

En caso de que se considere que no se debe instalar una estación de medición de sedimentos y temperatura a la entrada del río Porce, se recomienda un estudio detallado de tiempos de viaje en el río Porce y el embalse Porce II. Esta información sería complementaria a la que brinda la estación El Diamante.

Para obtener buenos resultados con ELCOM en el embalse Porce II es necesario actualizar la batimetría.

Bibliografía

- Anohin, V.V. et al., 2006. Effect of long internal waves on the quality of water withdrawn from a stratified reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), p.1134. Available at: <http://link.aip.org/link/JHEND8/v132/i11/p1134/s1&Agg=doi>.
- Branco, C.W.C. et al., 2009. Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 14, pp.175-191.
- Casamitjana, X. et al., 2003. Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia*, 504(1-3), pp.21-28. Available at: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?id=doi:10.1023/B:HYDR.0000008504.61773.77>.
- Clarke, S.R. & Imberger, J., 1996. The effect of shear in selective withdrawal. *International Journal of Multiphase Flow*, 22(7), p.140. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932297885175>.
- Coates, M. & Ferris, J., 1994. The radiatively driven natural convection beneath a floating plant layer. *Limnology and Oceanography*, 39(5), pp.1186-1194. Available at: http://www.aslo.org/lo/toc/vol_39/issue_5/1186.html.
- Dallimore, C., Imberger, J. & Ishikawa, T., 2001. Entrainment and turbulence in saline underflow in lake Ogawara. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(November), pp.937-948.
- Fischer, H. et al., 1979. *Mixing in inland and coastal waters* Academic press, ed.,
- Folkard, A.M. & Coates, M., 2009. Flow in wetlands and macrophyte beds. In *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Academic Press - Elsevier, pp. 594-605.
- Ford, D.E. & Johnson, M.C., 1983. *An assessment of reservoir density currents and inflow processes*,
- Gunkel, G. & Casallas, J., 2002. Limnology of an equatorial high mountain lake - Lago San Pablo, Ecuador: the significance of deep diurnal mixing for lake productivity. *Limnologica*, 32, pp.33-43.

- Han, B. et al., 2000. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecological Modelling*, 125(2-3), pp.109-122. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380099001763>.
- Hodges, B.R., 2009. Hydrodynamical modeling. In *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press - Elsevier, pp. 613-627. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B99B2-4VRJ214-2W/2/881f83594435d70aa38893f2508c582d>.
- Hodges, B.R. & Dallimore, C., 2006. *Estuary, lake and coastal ocean model: ELCOM, v2.2 Science manual*, Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estuary,+Lake+and+Coastal+Ocean+Model:+ELCOM+v2.+2+Science+Manual#0>.
- Hodges, B.R. & Dallimore, C., 2007. *Estuary, lake and coastal ocean model: ELCOM, v2.2 User manual*, Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estuary+,+Lake+and+Coastal+Ocean+Model+:+ELCOM+v2+.+2+User+Manual#1>.
- Imberger, J. & Parker, G., 1985. Mixed layer dynamics in a lake exposed to a spatially variable wind field. *Limnology and Oceanography*, 30(3), pp.473-488. Available at: http://www.aslo.org/lo/toc/vol_30/issue_3/0473.html.
- Imberger, J., Thompson, R. & Fandry, C., 1976. Selective withdrawal from a finite rectangular tank. *Journal of fluid mechanics*, 78(03), pp.489–512. Available at: http://journals.cambridge.org/abstract_S0022112076002577 [Accessed July 25, 2011].
- Linacre, E., 1968. Estimating the net-radiation flux. *Agricultural Meteorology*, 5(1), pp.49-63. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0002157168900228>.
- Martin, James L. & McCutcheon, S.C., 1999. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*, CRC Press LLC.
- Monismith, S.G. & MacIntyre, S., 2009. The Surface mixed layer in lakes and reservoirs. In G. E. L. B. T.-E. of I. Waters, ed. *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Academic Press - Elsevier, pp. 636-650. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B99B2-4VRJ214-2H/2/df9fb7a5181d77fd915b8a83aa1ee65>.
- Palacio, C.A., 2002. *Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la bahía Meldorf en la costa del mar del norte alemán*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

- Peeters, F. & Kipfer, R., 2009. Currents in stratified water bodies 1: density-driven flows. In G. E. Likens, ed. *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Academic Press - Elsevier, pp. 530-538. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B99B2-4VRJ214-2K/2/76520c3b43742a6861088e5a5f727abd>.
- Ramos, R.L., 2007. *Modelación del efecto del viento sobre la estructura térmica del embalse Porce II*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Roldán, G. & Ramírez, J.J., 2008. *Fundamentos de limnología neotropical* 2nd ed. universidad de Antioquia, ed., Medellín.
- Rueda, F.J., 2006. Basin scale transport in stratified lakes and reservoirs : towards the knowledge of freshwater ecosystems. *Limnetica*, 25, pp.33-56.
- Rueda, F.J., Moreno-Ostos, E. & Armengol, J., 2006. The residence time of river water in reservoirs. *Ecological Modelling*, 191(2), pp.260-274. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380005002760> [Accessed July 16, 2011].
- Rueda, F.J. et al., 2005. On the effects of topography on wind and the generation of currents in a large multi-basin lake. *Hidrobiologia*, 532, pp.139-151.
- Villegas, B.E., 2004. *Utilización de un modelo numérico para el estudio de la estructura térmica del embalse Porce II*. Universidad Nacional de Colombia. sede Medellín.
- Van der Weert, R. & Kamerling, G., 1974. Evapotranspiration of water hyacinth (Eichhornia Crassipes). *Journal of Hydrology*, 22, pp.201-212.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology: lake and river ecosystems* 3rd ed., Academic Press. Available at: <http://www.amazon.com/Limnology-Third-Lake-River-Ecosystems/dp/0127447601> [Accessed February 11, 2011].
- Wüest, A. & Lorke, A., 2003. Small - scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(Section 3), pp.373-412.