

**DESARROLLO DE UN MODELO COMPUTACIONAL PARA LA MODELACIÓN  
Y SIMULACIÓN DEL OXIGENO DISUELTO DEL RÍO MANZANARES**

**ELIAN DAVID ALVIS CAMACHO  
EDGARDO JOSE NIEVES PALACIO**

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
SANTA MARTA D.T.C.H.  
MARZO 2008**

**DESARROLLO DE UN MODELO COMPUTACIONAL PARA LA MODELACIÓN  
Y SIMULACIÓN DEL OXIGENO DISUELTO DEL RÍO MANZANARES**

**ELIAN DAVID ALVIS CAMACHO  
EDGARDO JOSE NIEVES PALACIO**

**Memoria de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**

**Director:  
Francisco García Rentera  
Ingeniero Sanitario  
Magíster en Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
SANTA MARTA D.T.C.H.  
MARZO 2008**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Santa Marta, 15/Marzo/2008

DEDICO:

En primer lugar agradezco a Dios por acompañarme cada día, entregarme su sabiduría, comprensión y enseñanza. Señor, gracias por darme fuerzas en momentos difíciles y enseñarme lo bonita que es la vida que me has regalado. Te prometo que cada día tratare de ser mejor, no olvidando nunca la humildad.

A mis padres Antiar Alvis y Rosa Camacho, que han sido mi mayor modelo vida, les agradezco la paciencia, confianza, apoyo y ejemplo de vida, ya que sin ustedes no habría podido lograr esta primera meta. Este logro se los dedico a ustedes y es un reflejo de sus vidas, vidas que se unieron jóvenes y con amor, amor del que nací yo, gracias padres los quiero con todo mi corazón.

A mis hermanos Sergio y Oriana, gracias por toda la ayuda y preocupación. De igual manera, a mi Abuelo Hilario por darme muestra de que lo que dignifica al hombre es el trabajo y tesón con que enfrenta la vida.

A mis Amigos, docentes y compañeros de la corte 2003-I, entre ellos Tatiana, edgardo, Eddie, Pache. Por su soporte valioso y constante en la construcción de este proyecto.

A todos ellos y ellas gracias.

*ELIAN ALVIS CAMACHO*

DEDICO:

A Dios el creador, por llenarme de fortaleza espiritual para seguir el duro camino de la vida siempre con la frente en alto y tratando de salir adelante por mí y por mi familia.

A mis padres Edgardo Segundo Nieves Y María Cristina Palacio, esos seres maravillosos que me dieron la vida, quienes han sido mis guías y consejeros a lo largo de mi vida, quienes en unión con mis hermanos Andrés Felipe y Cristian de Jesús, me dieron fuerzas para seguir luchando y cumplir mi máspreciado sueño, ser Ingeniero.

A todos mis amigos y compañeros que siempre me brindaron apoyo, con la certeza de que este sueño que un día comencé con muchas dificultades llegaría a un final feliz debido a que siempre estuvieron seguros de mis destrezas y cualidades.

*EDGARDO NIEVES PALACIO*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero Francisco García por su apoyo, motivación y dirección.

Al cuerpo de profesores que a lo largo de toda la carrera estuvieron siempre dispuestos a brindarnos su conocimiento para nuestro crecimiento profesional y personal...

A la universidad por habernos abierto un día las puertas para empezar el desarrollo de nuestros estudios y hoy brindarnos la dicha de todo estudiante de recibir su título profesional...

A todos y cada una de las personas que de una u otra forma estuvieron todo el tiempo a nuestro lado apoyándonos y dándonos fuerza moral para no desfallecer en nuestra carrera hacia el título, aportando cada uno su granito de arena...

A ELIAN por haber estado siempre ahí evitando que desfalleciera en lucha por terminar nuestro proyecto de grado, y por brindarme siempre su amistad incondicional... EDGARDO NIEVES....

A EDGARDO por su apoyo incondicional en los momentos buenos y malos, por su gran dedicación y creer en este proyecto tanto como yo, pero sobre todo por brindarme su gran amistad....ELIAN ALVIS...

**A TODOS ELLOS GRACIAS!**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO .....	5
<b>3 MARCO TEORICO .....</b>	<b>6</b>
3.1 LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN RÍOS. ....	6
3.2 MODELOS DE CALIDAD DE AGUA Y SU DESARROLLO HISTÓRICO. ....	8
3.3 ESTRUCTURA Y DESARROLLO DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA. ....	9
3.4 ANTECEDENTES.....	13
3.4.1 <i>Experiencias Internacionales de Modelación de Calidad de Agua en Ríos.</i> 13	
3.4.2 <i>Experiencias Nacionales de Modelación de Calidad de Agua en Ríos.</i> 15	
3.4.3 <i>Experiencias Locales</i> .....	16
<b>4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDIO .....	17
4.1.1 <i>Localización General</i> .....	17
4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	18

4.2.1	<i>Perfil De La Corriente Principal</i> .....	18
4.2.2	<i>Análisis Hidrológico</i> .....	19
4.2.3	<i>Suelos</i> .....	20
4.2.4	<i>La cobertura vegetal</i> .....	21
4.2.5	<i>Vientos</i> .....	22
4.2.6	<i>Temperatura</i> .....	23
4.2.7	<i>Periodos De Lluvia Y Temporada Seca</i> .....	23
	FUENTE: (RÁPELO Y BARRANCO, 2007).....	24
4.3	MODELO CONCEPTUAL.....	24
4.4	DESARROLLO MODELO COMPUTACIONAL.....	26
4.4.1	<i>Diseño de software</i> .....	26
4.4.2	<i>Alimentación del modelo</i> .....	43
4.4.3	<i>Calibración y validación</i> .....	49
4.5	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	50
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y ANALISIS DE SIMULACIONES</b> .....	<b>51</b>
5.1	MODELO CONCEPTUAL.....	51
5.1.1	<i>Representación conceptual del Oxigeno Disuelto</i> .....	51
5.1.2	<i>Segmentación Hidráulica</i> .....	54
5.2	MODELO COMPUTACIONAL.....	57
5.2.1	<i>Postulación e Implementación del MOSIOD</i> .....	57
5.2.2	<i>Calibración de MOSIOD</i> .....	60
5.2.3	<i>Validación de MOSIOD</i> .....	61
5.2.4	<i>Simulación de Oxigeno Disuelto</i> .....	63
5.3	SIMULACIONES COMPARATIVAS MOSIOD VS QUAL 2K.....	67
5.4	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS.....	70
5.4.1	<i>Escenario 1. Concentración del Oxigeno Disuelto del Río Manzanares sin carga contaminante en la Quebrada Matogiro</i> .....	71

5.4.2	<i>Escenario 2. Simulación del comportamiento de OD en el Río Manzanares al no existir carga contaminante en la quebrada con aguas residuales domésticas a la altura del corregimiento de Bonda. ....</i>	<i>74</i>
5.4.3	<i>Escenario 3. OD del Río Manzanares sin la carga contaminante de las quebradas Matogiro y la quebrada con ARD a la altura de Bonda. ....</i>	<i>77</i>
5.4.4	<i>Escenario 4. OD del Río Manzanares sin vertimiento de ARD a partir del barrio Mamatoco hacia abajo. ....</i>	<i>80</i>
5.4.5	<i>Escenario 5. Ausencia de extracciones de agua para recarga artificial del acuífero de Santa Marta. ....</i>	<i>83</i>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>90</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>94</b>
9.1	GUÍA DEL USUARIO. MOSIOD.....	94

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores totales Multianuales de Precipitación mensual (m.m.), Período 1970 – 1999 (Estación Aeropuerto Simón Bolívar).....	23
Tabla 2. Coeficientes de la aspereza de Manning para canales abiertos.....	34
Tabla 3. Balance de Materia.....	37
Tabla 4. Variación de velocidades y profundidades para flujos aireados a 20°C...39	
Tabla 5. Coeficientes de aireación de 1er orden, para distintos ríos a 20°C. ....	40
Tabla 6. Coeficientes de descomposición de 1er orden, para distintos ríos a 20°C. ....	41
Tabla 7. Factores $\Theta$ , para la obtención de las constantes cinéticas reales. ....	43
Tabla 8. Inventario de fuentes puntuales y quebradas. ....	44
Tabla 9. Inventario de fuentes difusas. ....	47
Tabla 10. Inventario de puntos de extracción .....	48
Tabla 11. Valores ingresados en MOSIOD frontera aguas arriba (Julio de 2005). 58	
Tabla 12. Caracterización de parámetros de los afluentes (Julio de 2005). ....	59
Tabla 13. Caracterización de la calidad del agua en cuatro (4) estaciones de monitoreo a lo largo del tramo simulado. (Julio de 2005). ....	59
Tabla 14. Valores ingresados en MOSIOD frontera aguas arriba (Mayo de 2006). ....	61

Tabla 15. Caracterización de parámetros de los afluentes (Mayo de 2006). .....	62
Tabla 16. Caracterización de la calidad del agua en cuatro (4) estaciones de monitoreo a lo largo del tramo simulado. (Mayo de 2006). .....	62
Tabla 17. Error calculados para el periodo de verano e invierno. ....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pasos en la construcción de un modelo de calidad de aguas (Somlyódy,1986).....	12
Figura 2. Área de Estudio. ....	18
Figura 3. Perfil Longitudinal del Rio Manzares .....	19
Figura 4. Rosa De Vientos de Santa Marta .....	22
Figura 5. Temperatura de Santa Marta.....	23
Figura 6. Distribución de la Precipitación, durante enero 1970 – octubre 1999. (Estación Aeropuerto Simón Bolívar).....	24
Figura 7. Esquema de la segmentación de MOSIOD para un río sin los tributarios. ....	28
Figura 8. Balance del flujo del elemento. ....	29
Figura 9. La manera de la cual el flujo de las fuentes no puntuales se distribuye a un elemento. ....	31
Figura 10. Canal Trapezoidal.....	32
Figura 11. Rata de Reareación (/d) Vs Profundidad y Velocidad. (Covar, 1976). .	40
Figura 12. Modelo Conceptual del rio Manzanares.....	52
Figura 13. Esquema de la segmentación de MOSIOD para el Río Manzanares ...	55
Figura 14. Distribución de las fuentes y estaciones de Monitoreo del Río Manzanares. ....	56

Figura 15. Simulación MOSIOD -Oxigeno Disuelto- Rio Manzanares, (Verano, Julio 2005) .....	65
Figura 16. Simulación MOSIOD -Oxigeno Disuelto- Rio Manzanares, (Invierno, Mayo 2006).....	66
Figura 17. Simulación MOSIOD Vs QUAL 2K, verano.....	68
Figura 18. Simulación MOSIOD Vs QUAL 2K, Invierno.....	69
Figura 19. Escenario 1. Oxigeno Disuelto del Río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante de la quebrada Matogiro. (Periodo de verano). .....	72
Figura 20. Oxigeno Disuelto del Río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante de la quebrada Matogiro. (Periodo de Invierno). .....	73
Figura 21. Escenario 2. OD del río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante aportada por la quebrada con ARD a la altura del corregimiento de Bonda. (Periodo de verano).....	75
Figura 22. Escenario 2. OD del río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante aportada por la quebrada con ARD a la altura del corregimiento de Bonda. (Periodo de invierno). .....	76
Figura 23. Escenario 3. OD del Río Manzanares sin la carga contaminante de las quebradas Matogiro y la quebrada con ARD a la altura de Bonda. (Periodo de verano).....	78
Figura 24. OD del Río Manzanares sin la carga contaminante de las quebradas Matogiro y la quebrada con ARD a la altura de Bonda. (Periodo de invierno).....	79
Figura 25. Escenario 4. OD del Río Manzanares sin vertimiento de ARD a partir del barrio Mamatoco hacia abajo. (Periodo de.....	81

Figura 26. Escenario 4. OD del Río Manzanares sin vertimiento de ARD a partir del barrio Mamatoco hacia abajo. (Periodo de.....	82
Figura 27. Escenario 5. Evaluación de la influencia de las extracciones de agua para la recarga artificial del acuífero de Santa Marta sobre la calidad del agua del río Manzanares. (Periodo de verano). ....	84
Figura 28. Escenario 5. Evaluación de la influencia de las extracciones de agua para la recarga artificial del acuífero de Santa Marta sobre la calidad del agua del río Manzanares. (Periodo de invierno).....	85

## RESUMEN

En el desarrollo de esta investigación se desarrollo una herramienta computacional y numérica propia que permita modelar y simular la concentración de Oxígeno Disuelto del Rió Manzanares (Santa Marta, Colombia). La herramienta designada como MOSIOD por los investigadores se fundamenta en la solución numérica de la ecuación de streeter y phelps para una dimensión. Para la formulación del algoritmo que soporto el desarrollo de la herramienta numérica asumiendo que siendo la escala espacial longitudinal mucho mayor que su ancho y su profundidad, las ecuaciones de movimiento y conservación de la masa se pueden promediar en la dirección transversal y en la profundidad. La herramienta fue calibrada y validada a las condiciones específicas del río manzanares, donde se plantea con la misma examinar diversos escenarios de saneamiento. La herramienta numérica se desarrollará bajo una aplicación de Visual Basic. NET con ficheros e interface grafica para el pre y pos procesamiento de los datos de entrada y resultados del modelo, pretendiendo que su facilidad de uso y amigabilidad tenga ventajas comparativas con otros modelos.

La metodología empleada comprendió la preparación de los datos, adquisición de condiciones de frontera, calibración del modelo numérico a partir de los datos obtenidos, descripción del comportamiento hidrodinámico a partir del modelo numérico de la ecuación de maning, calibrado y comparado con las simulaciones de de diferentes escenarios de simulación de calidad del agua planteados e igualmente reproducidos por el Qual 2k. Los resultados obtenidos mostraron que el patrón de la corriente hídrica, es la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en su recorrido hacia la desembocadura, así como la gran influencia de las cargas contaminantes de los vertimientos de aguas residuales domesticas.

# 1 INTRODUCCION

El acelerado crecimiento demográfico de la población mundial y el desarrollo industrial creciente (minería, agronomía, electricidad, etc.) han sido los factores desencadenantes de alteraciones del medio ambiente, siendo uno de los más afectados el acuático, debido a que son usados como fuente de agua o como receptores de las descargas de aguas residuales, originando alteraciones en las características propias del vital elemento y muchas veces las concentraciones vertidas superan la capacidad de autodepuración de los sistemas. Santa Marta, Magdalena, no es la excepción y es así como de manera incontrolada el crecimiento y el desarrollo implica un incremento en la presión sobre los cuerpos de agua superficiales, las corrientes superficiales de la ciudad en todo su recorrido están sometidas a procesos antropicos, que han creado una situación de deterioro físico del medio ambiente propio de sus rondas y de sus áreas de influencia. Siendo la contaminación uno de los principales factores que están asociados a dicha problemática y que en su conjunto forman parte de una situación de empobrecimiento del recurso y pérdida del valor paisajístico.

Dentro de la gestión ambiental de los recursos naturales, el recurso hídrico involucra la planificación, con miras a su conservación y el aprovechamiento sostenible. En todo este proceso se hace indispensable conocer como el Rio Manzanares, se comporta ante varios escenarios como la descarga de contaminantes en su cauce y anticipar las variaciones en las concentraciones de los parámetros de calidad de agua según la época del año. La importancia de conocer y evaluar estos factores, reside en que, al hacerlo, pueden formularse planes de manejo más adecuados o tener herramientas de gestión esenciales en el desarrollo sostenible, vinculándose entre si el desarrollo social, ecológico y económico, de tal forma que un descuido de los valores ecológicos perjudica a lo

largo el desarrollo económico y por ende al desarrollo social. Por consiguiente la herramienta adecuada para estos fines es la denominada genéricamente como modelos de calidad de aguas.

En la investigación la modelación y simulación es la herramienta de mayor relevancia, para la resolución de problemas en sistemas complejos, entre los que indudablemente se incluyen los sistemas ambientales como las corrientes superficiales. En contraste con los muestreos que solo reflejan la situación actual del cuerpo de agua sin permitir hacer predicciones representativas acerca del comportamiento de la variable en estudio. En tal sentido, la modelación es la herramienta pertinente para generar dichas predicciones, puesto que ciertamente utiliza los muestreos para calibrar y validar los modelos y a partir de los modelos calibrados poder hacer cuanta inferencia se quiera dentro de los límites de la racionalidad física.

Cada uno de los modelos de calidad del agua permiten simular condiciones actuales y futuras, de tal manera, que es posible representar escenarios, que nos permiten anticipar las variaciones que sufrirán los diversos índices o parámetros de calidad de aguas, en el cuerpo acuático en estudio. Ante dichas circunstancias se han desarrollado, aplicado y calibrado diferentes modelos numéricos que fueron desarrollados para diferentes condiciones físicas, climáticas, biológicas y hasta legales para la simulación de la calidad del agua, adaptándolos a las condiciones específicas de los escenarios que los desarrolladores de los modelos originales pretenden acercarse a su conocimiento y entendimiento; estos modelos sin embargo son posteriormente tomados por la comunidad científica para ser aplicado a otras latitudes, donde muchas veces no se tiene la certeza si las características ambientales para los cuales fueron originalmente diseñados sean aplicables, llevando el estudio a errores inaceptables que son por lo general muy difíciles de detectar.

Ahora bien, es necesario entonces empezar a crear una cultura en nuestro medio en la que se pretenda desarrollar nuestros propios modelos o al menos revisar la aplicabilidad de los ya existentes para un caso específico. Por consiguiente, surge el presente estudio, en el cual se construyó una herramienta propia para calibrar y validar un modelo para la hidráulica y Calidad de agua del río Manzanares (Santa Marta, Magdalena) en función de la concentración de Oxígeno Disuelto.

La modelación de la calidad del agua en un medio receptor se ha transformado en una práctica común en los últimos años debido a la necesidad que se le ha planteado a la sociedad moderna de preservar el medio ambiente y, en particular, los recursos hídricos. Por tal razón, la proliferación de numerosos modelos de diverso desarrollo, alcance y complejidad que abarcan toda la gama de necesidades generales desde el balance de masas hasta complejos modelos tridimensionales. Estas valiosas herramientas se vieron a su vez favorecidas por el notable avance de la informática, lo cual posibilita la resolución más rápida de algoritmos muy elaborados y las hace más accesibles a cualquier nivel de usuario, gracias a la mejora de las interfaces gráficas, siendo esta última virtud también la generadora de ciertos vicios muy comunes en la práctica ingenieril actual.

Cabe señalar que el oxígeno disuelto por lo general es mirado como la variable de estado, sobre todo durante estudios de asignación de cargas. En esa medida desarrollar un modelo computacional para esta variable, permitió determinar la variación de concentración de oxígeno disuelto en el río Manzanares que por su geomorfología, características hidráulicas y ubicación al pie de la Sierra Nevada de Santa Marta lo convierten en un sistema complejo, en el cual hay certeza de "parámetros sensibles". No obstante, la falta de investigadores e investigaciones dedicadas a elaborar herramientas propias contribuye en gran medida a que la modelación de corrientes superficiales se encuentre fundamentada en la aplicación y adaptación de modelos no propios.

No obstante, han surgido estudios del Río Manzanares la arteria principal de la ciudad de Santa Marta, que desde diferentes ópticas tratan de dar una solución a la problemática ambiental del río, acarreando múltiples elementos, algunas caracterizaciones aleatorias y puntuales de algunos parámetros físico-químicos; estos estudios de una u otra forma han ayudado a conocer de manera general parte de su comportamiento. De igual manera, dichos estudios se han centrado en identificar fuentes de contaminantes y otros en describir sus variables hidrológicas, sin profundizar en la dinámica e interacción de estos para predecir el comportamiento actual y futuro de sus concentraciones según la época del año.

Con base en esto y teniendo en cuenta que el Río Manzanares es la principal corriente que recorre la ciudad de Santa Marta esta investigación se planteó para el desarrollo de un modelo bajo una aplicación de Visual Basic que con su respectiva interfaz gráfica se presenta como un instrumento propio calibrado y validado que se articule a la gestión ambiental de las corrientes superficiales que en la actualidad en todo su recorrido están sometidas a procesos antropocéntricos, creando una situación de deterioro físico del medio ambiente propio de sus riberas y de sus áreas de influencia. Proyectándose como una herramienta necesaria para futuros proyectos ya sean de conservación, restauración, reglamentación u ordenamiento del Río Manzanares que requieran del uso del recurso del río.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Simular la calidad del agua del Río Manzanares mediante el desarrollo de una herramienta numérica computacional que incorpore las principales variables que afectan la concentración de oxígeno disuelto.

### **2.2 Objetivo Especifico**

2.2.1. Desarrollar un modelo conceptual que permita analizar los efectos de las principales variables que influyen en la concentración de oxígeno disuelto.

2.2.2. Determinar mediante una herramienta numérica computacional propia los efectos que las descargas de contaminantes, afluentes y extracciones de agua tienen sobre la variación de oxígeno disuelto en el Río Manzanares.

2.2.3. Examinar mediante una herramienta numérica computacional propia cuales son los escenarios y alternativas que favorecen el saneamiento del río Manzanares.

### **3 MARCO TEORICO**

#### **3.1 La Modelación de la Calidad de Agua en Ríos.**

Los modelos de calidad de aguas tienen por finalidad determinar las nuevas concentraciones de contaminantes del cuerpo de agua en cada punto y a lo largo del tiempo de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidos. (Streeter y Phelps, 1925; Reckhow,. 1994; Shanahan et al., 1998; Park & Lee,. 2002). Por lo tanto, Un modelo matemático de la calidad de agua de un río, calibrado y verificado con datos de campo, es una herramienta útil en la planeación e identificación de alternativas técnicas factibles de saneamiento (Camacho, 2001). El desarrollo y aplicación en las últimas décadas de un amplio rango de técnicas de modelamiento matemático de la calidad del agua, se ha producido como una respuesta a la necesidad de disponer de instrumentos para estimar y evaluar los impactos económicos, ambientales y ecológicos de planes alternativos de control de la contaminación, a fin de formular y adoptar medidas relacionadas con la calidad del agua o políticas de administración de recursos (Céspedes, 2002).

Un modelo de calidad de agua es una representación de la realidad física que simula las condiciones ambientales y su respuesta ante estímulos determinados (Espinoza, 2001). Por lo tanto, corresponderá un set de expresiones matemáticas que definen los procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en un cuerpo de agua (Vargas, 2003). Las ecuaciones están basadas fundamentalmente en la conservación de la masa y/o energía, de tal forma que existen tres (3) fenómenos: ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema, el transporte y las reacciones en el cuerpo de agua (Loucks et al 1982). El transporte puede ser por advección y/o dispersión, por lo tanto dependerá de

las características hidrodinámicas e hidrológicas del cuerpo de agua y del tipo de modelo (Chapra, 2003).

La cantidad y frecuencia de los caudales circulantes son unos componentes esenciales que determinan la calidad del agua, la capacidad de abastecimiento y la integridad ecológica del ecosistema de ribera (Díez y Martínez, 2003). De hecho, el caudal está íntimamente relacionado con los procesos geomorfológicos, físicos, químicos y biológicos del ecosistema, por lo que se considera una variable fundamental (Díez y Martínez, 2003). El flujo de agua en un río puede describirse usando ecuaciones que conservan masa y velocidad adquirida (MacDonald y otros., 1995).

El oxígeno disuelto (OD) por lo general es mirado como la variable de estado, sobre todo durante estudios de asignación de carga (Chapra, 2003). Uno de los comportamientos más dicentes del grado de contaminación de una corriente está determinado por el nivel de oxígeno disuelto a lo largo de la corriente (Camacho, 2001). Con un modelo de OD se puede visualizar que parte del sistema tiene más influencia sobre los otros cuando se produce un cambio (Ricaurte, 2001). En este tipo de modelos, el parámetro que condiciona las concentraciones de oxígeno disuelto es el coeficiente de reareación, el cual constituye un parámetro de ajuste debido a que las concentraciones experimentales de esta variable en el río pueden encontrar muy cercanas al nivel de saturación, de lo que se deduce menor reareación del cuerpo de agua (Poch, 1999). El balance entre el suministro de oxígeno y la desoxigenación en un curso fluvial se expresa normalmente en función del tiempo de viaje o distancia aguas abajo desde la fuente de contaminación. La curva resultante, conocida como la curva de déficit de oxígeno puede ser determinada tanto a partir de mediciones de campo como simulada por un modelo matemático, y representa la distribución de OD a lo largo del curso para un conjunto dado de condiciones ambientales (Poch, 1999).

La concentración de OD es vital para la supervivencia de peces. Es un sensor de la salud ecológica de un cuerpo superficial de agua y es el parámetro más importante a proteger (Chang, 2005). El límite letal agudo de OD es la concentración por debajo de 3mg/L para la mayoría de especies (USEPA, 1986). Es decir estos no pueden sobrevivir cuando la concentración de OD es menor a este valor (Novotny., 2002). El Valor mínimo para la concentración OD se ha establecido en 4mg/L considerando condiciones propicias para el hábitats (USEPA, 1986) y para apoyar la dinámica ambiental de la corriente (Ellis, 1937; Thompson, 1925).

### **3.2 Modelos de Calidad de Agua y su Desarrollo Histórico.**

De la revisión de la literatura sobre este asunto (Park and Lee, 2002; Kannel, 2007; Streeter and Phelps, 1925, chapra, 1997, MacAvoy y otros, 2003) se deduce que modelos matemáticos o numéricos son herramientas adecuada para la predicción del comportamiento de la calidad del agua en un río u otro cuerpo de agua. La evolución de los modelos de calidad de agua fluvial ha estado paralela al desarrollo computacional, al desarrollo de cálculo numérico en general, y al desarrollo de la modelación numérica en áreas de conocimiento próximas. Un hito histórico corresponde "El estudio de la polución y purificación natural del río Ohio" (Streeter & Phelps, 1925), que presenta la primera modelación de OD y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) para un río. Este modelo puede considerarse el "padre" de todos los modelos que posterior y actualmente se siguen elaborando.

Los modelos contribuyen a lograr un entendimiento de los diferentes procesos que se llevan a cabo y sirven como herramienta en la búsqueda de soluciones y alternativas de saneamiento, por tal motivo se debe procurar agilizar los procesos de calibración de los mismos, garantizando siempre óptimos resultados, que le permitan al modelador tomar decisiones basado en representaciones de sistemas,

lo más parecido posible a los reales (Rodríguez, 2002). En los últimos veinte años, con el uso aumentado de computadoras en el campo de hidrología, ha habido un número de desarrollos significantes en el campo del modelado de la calidad de agua y éstos han resultado en una variedad de modelos incluidos WASP5 (Ambrose et al., 1987), CE-QUALW2, STREAM (Park and Lee, 1996), DYRESM (Hamilton and Schladow, 1997), SIREM1 (Park and Uchrin, 1997), SIMCAT, TOMCAT, QUAL2E, el QUASAR, MIKE-11 e ISIS. (Cox, 2003). De la gran cantidad de modelos existentes, se pueden destacar: DOSAG, QUAL I, PIONEER I, RECEIV, SWMM, WODA, QUAL II, MIKE21, DUFLOW, etc. La familia de QUAL (I, II, 2E, 2K) son unos de los más completo y ampliamente usado (Chapra, 2003). Y su fundamento teórico se encuentra en las ecuaciones de transporte de masa por advección-dispersión integrado para cada parámetro de calidad de agua en el espacio y en el tiempo. (McAvoy et al., 2003).

### **3.3 Estructura y Desarrollo de un Modelo de Calidad de Agua.**

El objetivo primario del desarrollo de cualquier modelo de calidad de agua, es producir una herramienta que tenga la capacidad de simular el comportamiento de las componentes hidrológicas y de calidad de un cuerpo de agua. El desarrollo de esta herramienta para simular el comportamiento del prototipo, se hace aplicando un modelo matemático, llevando consigo un proceso laborioso, que comprende; I) elaboración de un premodelo, II) Construcción del modelo inicial mediante calibración y ajuste, III) Validación, IV) Seguimiento y validación del Modelo Final. (Sainz., et al, 1990). Otros Autores (Whitehead, 1997., Camacho et al., 2000; Kachiashvili, 2006;) resumen las fases en: 1) Representación conceptual. 2) Representación funcional. 3) Representación computacional.

La representación conceptual comprende una idealización gráfica del prototipo, considera la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas

y la identificación de las condiciones de borde e interrelaciones entre las partes del prototipo. Normalmente, este proceso impone divisiones del prototipo en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos que el modelo debe servir, estos elementos se definen de acuerdo a algunas simples reglas geométricas, y se diseña el modo por el cual serán conectados, tanto física como funcionalmente, como parte integrante de un todo. Una parte de esta estructuración es la designación de aquellas condiciones de borde a ser consideradas en la simulación. La representación funcional vincula las características físicas, procesos, y condiciones de borde en sets de ecuaciones matemáticas. Esto implica la definición precisa de cada variable y sus relaciones con todos los otros parámetros que caracterizan el modelo o sus relaciones entrada salida. La representación computacional es el proceso por el cual, el modelo funcional es traducido a formulas matemáticas y procedimientos computacionales requeridos para la solución del problema.

Más específicamente en el desarrollo de un modelo de calidad de aguas así como de cualquier otro, debe seguir distintas etapas como lo son:

- *Análisis del problema.* En esta fase se debe observar el funcionamiento del sistema a modelar, identificar los procesos que determinan su comportamiento, obtener información cuantitativa acerca de sus principales variables y su evolución en el tiempo, identificar relaciones causa efecto, entre otros (Zaror, 2002).
- *Conceptualización.* Se refiere al funcionamiento del sistema de acuerdo a los datos disponibles acerca del mismo, además de la experiencia existente en sistemas similares, permitiendo formular hipótesis sobre su funcionamiento (Zaror, 2002).
- *Postulación e implementación del modelo.* Se postulan y se formulan las ecuaciones, se describen los distintos procesos que tienen lugar en el modelo conceptual formado, se establecen las relaciones entre ellas y se procede a la

resolución mediante técnicas matemáticas. La calidad del modelo depende críticamente de la selección adecuada del modelo conceptual base (Zaror, 2002).

- *Calibración de los parámetros del modelo.* Esta fase tiene por objetivo forzar a que el modelo reproduzca en mayor o menor grado la respuesta del sistema real. Para ello se ajustan los valores numéricos de los parámetros de tal forma de reducir al mínimo las diferencias entre los datos reales y las predicciones del modelo bajo condiciones comparables (Zaror, 2002).

- *Validación.* Se realiza una vez ya calibrado el modelo, aquí se comprueba la capacidad predictiva del modelo, en base a observaciones no utilizadas en la calibración. (Zaror, 2002).

- *El Análisis de Sensibilidad.* Determina el efecto de las variaciones en los parámetros sobre la respuesta del modelo, de esta forma se pueden identificar aquellos parámetros que más afectan a la calidad de la predicción (Zaror, 2002).

Uzunov y otros (2006), manifiestan que la formulación del modelo conceptual base se realiza a partir de información de la realidad y de las hipótesis que surjan al evaluar dichas observaciones. La implementación matemática tendrá que tomar en consideración los procesos y variables que se desea predecir, y con qué objetivo. La comparación de las soluciones del modelo con los hechos reales no solo permitirá apreciar la bondad del modelo, sino también mejorarlo, conduciendo a un enriquecimiento, modificación y/o reformulación de los conceptos e hipótesis implícitas. La Figura 1 ilustra el proceso de construcción de un modelo de calidad de aguas con las etapas descritas anteriormente relacionadas entre sí.

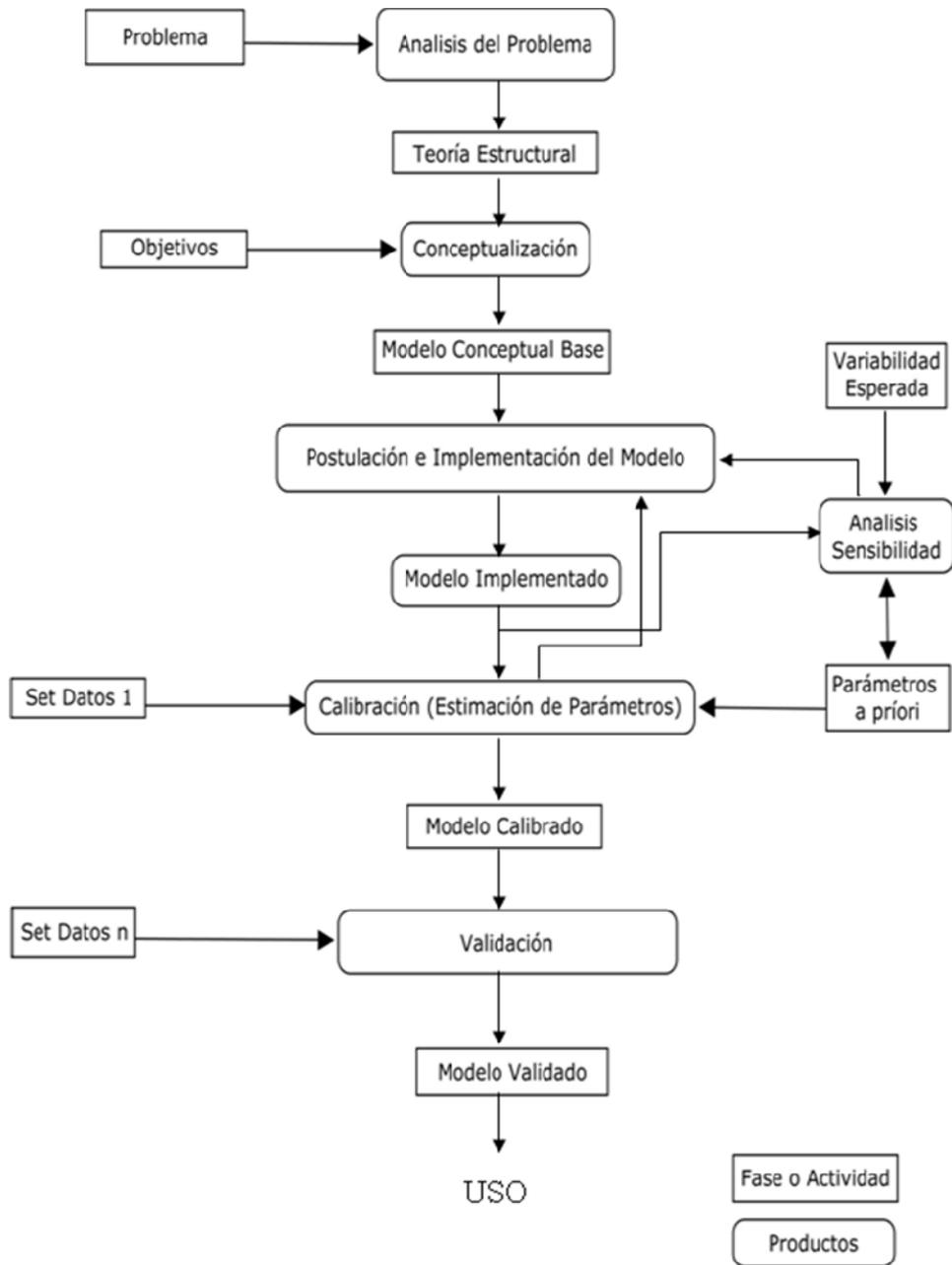


Figura 1. Pasos en la construcción de un modelo de calidad de aguas (Somlyódy,1986)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Citado por Aguayo, 2005

### **3.4 Antecedentes.**

#### **3.4.1 Experiencias Internacionales de Modelación de Calidad de Agua en Ríos.**

Pese a que los modelos de calidad de aguas constituyen una poderosa herramienta de predicción del comportamiento ambiental de los ecosistemas acuáticos, en las experiencias realizadas a nivel internacional se visualiza la alta versatilidad de los mismos, característica que se evidencia principalmente por los diversos objetivos que estos persiguen. A modo de ejemplo se pueden mencionar los trabajos realizados por Park & Lee (2002), Whitehead et al. (1997), Sincock et al., (2003),

Park y Lee (2002), publican un trabajo acerca de un estudio de modelado de calidad en el río Nakdong en Corea, uno de los 4 sistemas hídricos más importantes en Corea, pues sirve del recurso de agua la área sur-oriental. Actualmente, cerca de 7 millones de personas residen dentro de la cuenca y más que 13 millón personas usan el río para consumo y riego. La finalidad del estudio fue revisar la relación entre las estrategias de control de contaminación y la calidad de agua. El estudio de modelado incluye el desarrollo y aplicación de un modelo de computadora, adecuado para la corriente principal. El modelo usado fue el QUAL2E (USEPA,1986) al cual se le efectuaron algunas modificaciones en el código fuente para superar las limitaciones, tales como la conversión de la muerte de algas para DBO, desnitrificación, y el cambio causado por la respiración de las plantas sobre el OD.

Whitehead y otros. (1997), evaluaron los impactos de las descargas de efluentes sobre los ríos del Reino Unido, para ello desarrollaron el modelo (QUASAR), El QUASAR que se fundamenta en un simple concepto de celdas en serie basado en la conservación de masas para aguas y solutos dentro de una celda totalmente mezclada. Sincock y colaboradores., (2003), en su trabajo, realizaron la

identificación de los parámetros de calidad de agua y la incertidumbre asociada en las simulaciones del modelo. Donde el rendimiento del modelo es valorado en una aplicación para el río de Ouse de Bedford, UK., usando el análisis de Monte Carlo.

Recientemente Kannel et al., (2007) realizó un estudio en el río Bagmati en el valle de Katmandú (Nepal), los objetivos principales de este estudio fueron: examinar el impacto de descargas en la recepción de cuerpos del agua, para determinar las cargas máximas de la contaminación en el río y la capacidad máxima de carga asegurando los criterios de la calidad del agua para Demanda Bioquímica de Oxígeno, Oxígeno Disuelto, Nitrógeno Total, Fosforo, pH y temperatura del agua. Para ello utiliza el QUAL2Kw, desarrollado por Pelletier et al. (2006), el modelo de calidad de agua de torrente unidimensional fue calibrado y representaba los datos de campo muy bien con algunas excepciones. El análisis de sensibilidad mostró que el modelo era muy sensible para la profundidad de agua y moderadamente para las fuentes difusas.

Entre las experiencias destacables en Latinoamérica, se presentan los trabajos realizados por Petroni (2000), quien aplicó el modelo denominado EIH AD32, al Río de la Plata (Argentina), para analizar la interacción de la ciudad de Buenos Aires y su zona urbana con el mismo, el modelo desarrollado está dividido en dos (2) partes conceptuales: la resolución del transporte de las sustancias disueltas en el medio a causa de procesos físicos y la resolución del decaimiento y/o transformación de las mismas en virtud de procesos físicos, químicos y bacteriológicos. En Brasil, Palmieri (2003) trabajó considerando el uso del Qual2E para el río Corumbataí, situado dentro del estado de São Paulo (Brasil), teniendo como objetivo el logro de una curva representativa para la calidad del agua del río. Las limitaciones inherentes al modelo, a la recogida de datos y al tratamiento estadístico de los datos disponibles habían obstaculizado un acuerdo mejor de la curva calculada con observada.

### **3.4.2 Experiencias Nacionales de Modelación de Calidad de Agua en Ríos.**

En nuestro país existe una gran cantidad de sistemas loticos con severos problemas de contaminación, debido principalmente, al vertido de aguas residuales con una alta carga orgánica (Guevara1989). En el ámbito Colombiano, se tienen antecedentes de modelación en corrientes como los ríos Medellín, Bogotá, Cauca, Chicamocha, Quindío, llevados a cabo por instituciones reconocidas como la Universidad de los Andes, de Antioquia, del Valle, Empresas Públicas de Medellín y otras (Lozano,2001).

En el marco del convenio de investigación entre la Universidad de los Andes y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se adelantó en el 2001 el proyecto de “Modelación de la Calidad del Agua del Río Bogotá” en el tramo Tibitoc – Desembocadura Río Magdalena. En él se evaluó la posible aplicación de diferentes modelos comerciales tales como QUAL2-E (EPA, 1986), QUAL2-K (Chapra, 2001), QUASAR (Whitehead, *et al.*, 1997), OTIS (Runkel, 1998), ADZ (Beer y Young, 1983), y MIKE-11 (DIH, 1992). Todos los modelos presentaron ventajas y desventajas en la evaluación; sin embargo se recomendó como modelo comercial para el Río Bogotá el modelo QUAL2-K, el cual fue calibrado y verificado con datos de tres campañas de muestreos, dentro de las conclusiones se destaca, que bajo las condiciones actuales de calidad del agua del Río provenientes de la cuenca alta incluso descargas pequeñas al paso por Bogotá causan el consumo total del OD del Río sin que sea posible la auto-depuración natural a lo largo del tramo de la Cuenca Media.

En un estudio realizado por Rodríguez (2002), se aplicó el Modelo de Calidad de Agua QUAL2E (EPA,1995) y el Modelo de Transporte de Contaminantes (ADE) en la cuenca alta del Río Bogotá, sector Villapinzón – Chocontá. Los datos utilizados para realizar la modelación se obtuvieron a partir del desarrollo de un programa de monitoreo y muestreo en un período de 4 meses. Las concentraciones de la

DBO arrojadas por el modelo alcanzan niveles altos en el paso por las curtiembres y el OD en este mismo sitio se reduce a niveles cercanos de 3 mg/l.

Un trabajo que no se puede dejar de mencionar es el que realizaron Lozano et al. (2003) en cinco ríos del departamento del Quindío, entre los que se cuentan, río Quindío, Roble, Santo Domingo y quebrada Cristales. El estudio tuvo como objetivo la búsqueda y selección del modelo de Simulación adecuado para implementar y determinar la capacidad de auto-depuración e ilustrar el comportamiento, real o hipotético, de los cuerpos de agua frente a acciones de contaminación o descontaminación de origen humano o natural.

### **3.4.3 Experiencias Locales**

En santa Marta, (Magdalena) experiencias exitosas en modelación de fuentes superficiales se tienen en los ríos Manzanares y Gaira respectivamente. El estudio que se llevo a cabo en el Río Manzanares, (Guizao y Díaz, 2007) utilizo el modelo QUAL2K (Chapra, 2003), a fin de evaluar las condiciones actuales y futuras de contaminación, y capacidad de auto purificación de este cuerpo de agua superficial, permitiendo formular estrategias que restablezcan las condiciones naturales del Río. La calibración del modelo se desarrollo un programa de muestreo que cubrió un periodo de seis (6) meses que cobijaron una época seca y otra lluviosa de acuerdo al régimen climático de esta zona y en la primera parte del año 2006, en donde se caracterizo el río Manzanares en sus condiciones hidráulicas e hidrológicas, se identificaron las fuentes de aguas residuales a si como sus extracciones de agua. Se determinaron parámetros en campo (OD, pH, conductividad, temperatura) y se tomaron muestras de agua que fueron llevadas a laboratorio para realizarles análisis de calidad de agua (DBO), en (4) cuatro estaciones de monitoreo a lo largo del río y en los afluentes más importantes.

## **4 METODOLOGÍA**

### **4.1 Área de Estudio**

#### **4.1.1 Localización General**

La cuenca del Río Manzanares se origina a partir de la unión de dos quebradas “Onaca y Jirocasaca” y se encuentra ubicada en la vertiente noreste de la sierra nevada de Santa Marta y se extiende desde el nivel del mar hasta la cota 2450 msnm, con una superficie de 174.54 Km<sup>2</sup>, un perímetro de 70.341 Km. y una longitud total del cauce principal de 33.497 Km. Los límites geográficos del Río Manzanares son: al norte con la región las Tinajas y la cuenca de la Quebrada Concha ; al este con las regiones La India , Donama y San Isidro, y la cuenca del Río piedra; al sur con las cuencas de la Quebrada Tijeras, Tamacá y del Río Gaira, y la con la región el Campano y Cerro Kennedy ; al Oeste con el Mar Caribe.

**Figura 2.** Área de Estudio.



Fuente: Modificado de Google Earth

## **4.2 Características Generales Del Área De Estudio**

### **4.2.1 Perfil De La Corriente Principal**

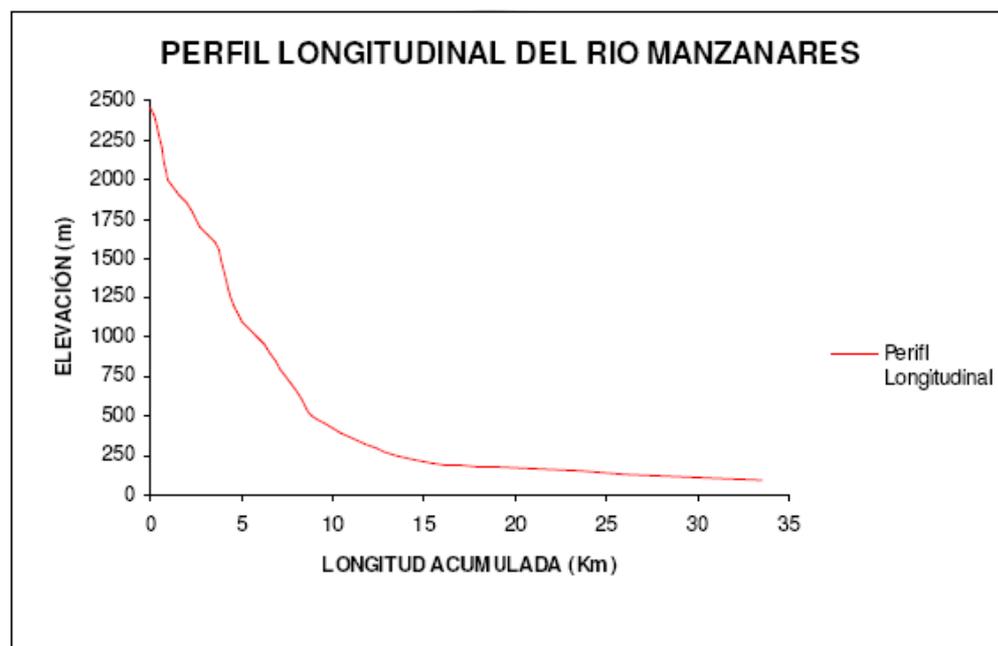
Determinar el perfil longitudinal del Río Manzanares significa describir la forma en que ésta pierde altura a lo largo de su recorrido desde la cuchilla de San Lorenzo hasta la desembocadura en el Mar Caribe.

Según de De Arco y De León (2006), un criterio determinante para la construcción del perfil es la *Pendiente*; esta característica controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que requiere el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las cuencas. No obstante, son muchas las

variables que determinan la pendiente del cauce de un Río, entre ellas el caudal, la carga de sedimentos y el tamaño de los mismos.

De Arco y De León (2006), establecieron la pendiente media de la cuenca del Río Manzanares en 0,073 y la pendiente media ponderada 0,331.

**Figura 3.** Perfil Longitudinal del Río Manzanares



Fuente: (De Arco, De Leon., 2006)

#### 4.2.2 Análisis Hidrológico

El análisis correspondiente se realizó con un aforo en el sitio donde la empresa Metroagua S.A. E.S.P tiene ubicada la Bocatoma localizada a los 11° 12' 18" de latitud Norte y 74° 05' 53" de longitud Oeste y distante 8.5 km de la ciudad. Para La distribución de los caudales, al igual que la precipitación en el flanco Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta es de tipo monomodal, es decir dos períodos

bien definidos, uno seco durante los meses de diciembre a julio y otro húmedo de agosto a noviembre, siendo el mes de octubre el de mayor escorrentía.

El río Manzanares en el sitio de medición (Bocatoma), tiene un lecho con presencia de rocas, alta pendiente y márgenes (paredes) regulares, al cual le corresponde un coeficiente de rugosidad (n) de 0.044, la pendiente calculada es 1.74 % (1.74 m por cada 100 m.) obtenida a partir de un levantamiento realizado por Metroagua S.A. E.S.P. en campo y el factor hidráulico R, calculado a partir de la relación "área / perímetro mojado", parámetros con los cuales fue posible estimar la velocidad de flujo para el nivel máximo

### **4.2.3 Suelos**

El área presenta una distribución de suelos influenciada en gran medida por el clima, la topografía, la litología y la diversidad biológica existente. En las terrazas marinas subcrecientes de acumulación localizadas en alturas menores a los 100 m.s.n.m. se desarrollan suelos con influencia del clima cálido seco; son superficiales, con poco desarrollo de horizontes, de texturas medias a gruesas, bien estructurados, con buen drenaje natural y propenso a los procesos de erosión por escurrimiento superficial. Las terrazas presentan inclusiones de suelos aluviales y coluviales especialmente en la vega del río donde existe un rejuvenecimiento de los suelos por aporte de materiales de desborde de los ríos. Son suelos moderadamente profundos, de texturas medias a gruesas, bien drenados y propensos a la erosión por escurrimiento superficial. Presentan pH ligeramente alcalino, altos contenidos de bases (Ca, Mg, Na y K), bajos contenidos de materia orgánica y altos contenidos de fósforo.

En las estribaciones de la Sierra y en forma ascendente, bajo clima medio húmedo se encuentran suelos desde superficiales hasta moderadamente profundos, poco evolucionados, correspondientes a suelos cafeteros. En las vertientes escarpadas de mayor altura (1800 m.s.n.m.) los suelos se desarrollan directamente sobre los

planos rocosos y en algunos casos tienen acumulaciones importantes de materia orgánica. Son suelos bien drenados, pH ligeramente ácido, bajos contenidos de fósforo, al igual que las bases, son muy frágiles con propensión a los movimientos en masa.

Los suelos del área en general, presentan un bajo grado de desarrollo debido a la influencia de los procesos denudativos con transferencia y pérdida progresiva por escurrimiento superficial y movimientos en masa favorecidos por el clima húmedo con altas precipitaciones, sobre materiales litológicos meteorizados que se disgregan fácilmente (granitos) y pendientes desde muy inclinadas hasta escarpadas.

Los suelos superficiales en las vertientes altas, hacen que el agua lluvia infiltrada alcance rápidamente los estratos rocosos subsuperficiales originando saturación y de planos de lubricación, favoreciendo los deslizamientos, que a esta altura, afecta principalmente los mantos de alteración y los suelos dejando al descubierto los espejos de roca como se pudo apreciar en las caminatas realizadas.

#### **4.2.4 La cobertura vegetal**

El área presenta una distribución de la cobertura vegetal de acuerdo con el clima, los suelos y la topografía (IGAC 1977). El área periférica a la ciudad de Santa Marta (Mamatoco) presenta una cobertura vegetal xerofítica dominada por cactus columnares, árboles y arbustos espinosos y una cobertura de gramíneas en mezcla con cactáceas suculentas y pequeños arbustos.

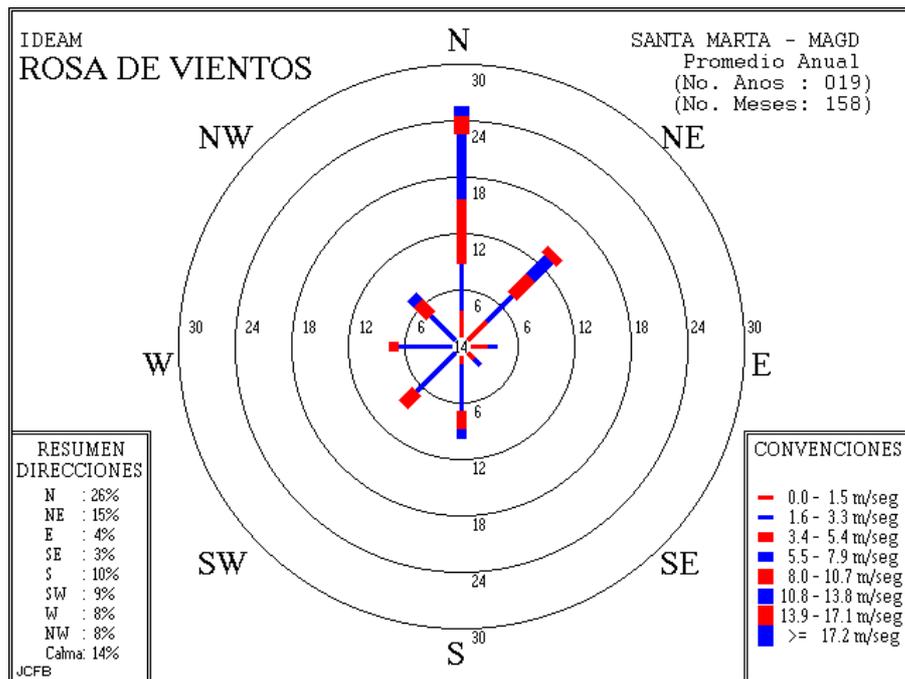
El uso actual de la tierra está dado por asentamientos humanos, infraestructuras, recreación y conservación. La siguiente zona un poco más elevada (hasta 300 m.s.n.m) y con más humedad (Bonda), la cobertura vegetal ha sido modificada por actividades agropecuarias, urbanas y de pastoreo.

En las estribaciones de la Sierra Nevada con altura similar a la anterior, la cobertura vegetal ha sido modificada casi en su totalidad debido a las condiciones climáticas más húmedas y de suelos, que favorece el uso de la tierra con actividades agropecuarias especialmente en zona aluviales y coluviales (Matogiro, Los Naranjos, La Revuelta, Mata de Plátano y Guachaca).

#### 4.2.5 Vientos

Los vientos en la ciudad de Santa Marta, se encuentran por direcciones hacia el norte en 26% y al Nor-Este en 15 % siendo estas dos direcciones las predominantes durante el año. A continuación se presenta la Rosa de los vientos de la ciudad de Santa Marta.

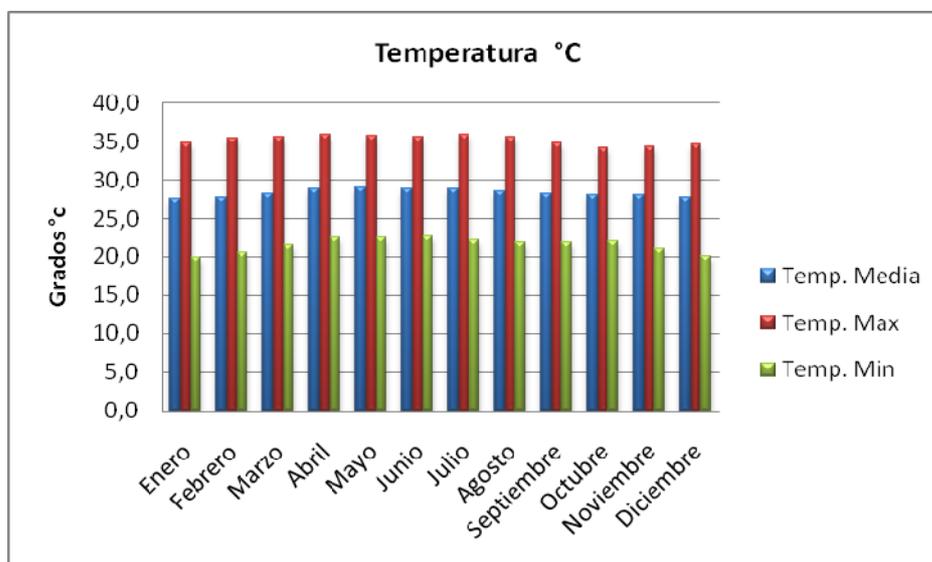
**Figura 4.** Rosa De Vientos de Santa Marta



Fuente: IDEAM

#### 4.2.6 Temperatura

Figura 5. Temperatura de Santa Marta



Fuente: IDEAM

#### 4.2.7 Periodos De Lluvia Y Temporada Seca

En la tabla 1 se consignan los valores medios multianuales de precipitación de acuerdo a los registros de la estación del Aeropuerto Simón Bolívar con datos observados durante el periodo de 1970 al 1999.

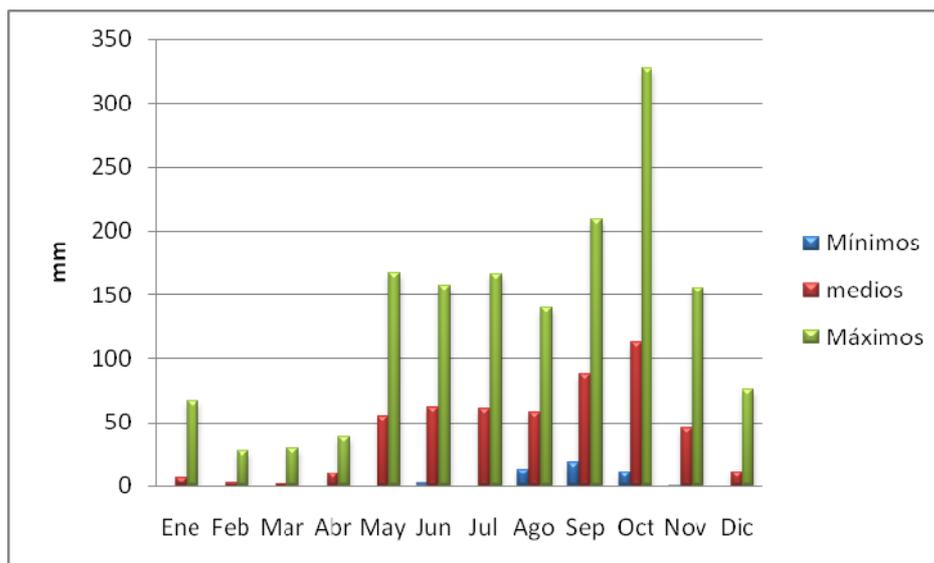
**Tabla 1.** Valores totales Multianuales de Precipitación mensual (m.m.), Período 1970 – 1999 (Estación Aeropuerto Simón Bolívar).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Minimos</b>	0	0	0	0	0	2,3	0	13,1	18,4	11	0,6	0
<b>Medio</b>	6,2	2,7	1,7	9,9	55	61,6	61	57,8	87,7	112	44,8	11
<b>Maximos</b>	66,6	28	30	38	167	157	166	140	209	327	154,9	75

En la ciudad de Santa Marta la precipitación más alta se presenta en los meses de octubre con 327 mm y septiembre con 209 mm. La precipitación más baja se

presenta durante los meses de enero, febrero, marzo y abril donde es prácticamente nula.

**Figura 6.** Distribución de la Precipitación, durante enero 1970 – octubre 1999. (Estación Aeropuerto Simón Bolívar)



Fuente: (Rápelo y Barranco, 2007)

### 4.3 Modelo Conceptual

El fundamento teórico del modelo conceptual fue producto de la revisión de modelos de calidad de agua (Oxígeno Disuelto) y de dispersión de contaminantes para cursos de agua superficiales, donde se analizó y seleccionó las ecuaciones aplicables al régimen hidráulico del río Manzanares. Además, la ecuación de transporte de contaminantes, y parámetros influyentes en comportamiento del Oxígeno Disuelto en corrientes superficiales, mediante publicaciones nacionales e internacionales, bibliografía interna, cursos de modelación ambiental y tesis.

El modelo conceptual se fundamenta en un conjunto de conceptos que permitan describir la realidad mediante representaciones lingüísticas y gráficas. El modelo conceptual posee una serie de propiedades de expresividad, simplicidad y formalidad. Para ello se utilizó el modelo entidad-relación, que consiste en tomar un elemento del sistema, en nuestro caso el OD y relacionarlo con un conjunto de elementos que puedan tener influencia o dependencia del él. Los modelos de entidad-relación poseen los siguientes conceptos: entidades, relaciones, atributos, dominios de atributos, identificadores y jerarquías de generalización.

Para ello el diseño conceptual se construyó un esquema local para la variable principal (Idealización gráfica), en esta fase consideramos la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas y la identificación de las condiciones de borde e interrelaciones entre las partes del prototipo, imponiendo divisiones en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos del modelo, estos elementos se conceptualizaron de acuerdo a algunas simples reglas geométricas, y se diseñó el modo por el cual serán conectados, tanto física como funcionalmente, siendo parte integrante de un todo el Oxígeno Disuelto.

En esta fase se tuvieron presente dos grupos principales de influencia en los procesos de OD. Los procesos físicos que involucran radiación solar que proporciona la luz y calor, así como el agua que modifica las condiciones hidráulicas del cauce (la profundidad, la anchura, el fondo, los substratos, etc.), proporcionando los hábitats de los organismos vivientes. Los procesos biológicos involucran tres grupos de organismos responsables para la producción de oxígeno (productores: las algas) y el consumo de oxígeno (los consumidores y reductores).

Seguidamente se planteó el diseño lógico con el cual se obtiene un esquema lógico local para cada esquema conceptual local. Estos esquemas lógicos se integran después para formar un esquema lógico global que represente todas las

vistas de los distintos parámetros que interactúan con el Oxígeno Disuelto. De esta manera, se construye la representación funcional donde al revisar la vinculación de las características físicas, procesos, y condiciones de borde en conjuntos de ecuaciones matemáticas. Para finalmente crear una definición precisa de cada variable y sus relaciones con todos los otros parámetros que caracterizan el modelo o sus relaciones de entrada-salida.

#### **4.4 Desarrollo Modelo Computacional**

El desarrollo de la herramienta computacional estuvo fundamentado en obtener como resultado:

- Los efectos que la carga de contaminantes tienen sobre la variación de oxígeno en el río manzanares.
- La influencia del comportamiento hidráulico del río manzanares sobre la concentración de oxígeno.
- La variación espacial y temporal del oxígeno disuelto en el río manzanares.

##### **4.4.1 Diseño de software**

A partir de la representación conceptual de las variables influyentes en el Oxígeno Disuelto del Río Manzanares, el modelo denominado como MOSIOD (Modelo de Simulación de Oxígeno Disuelto) se desarrolla bajo una aplicación de Visual Basic, que presenta amigabilidad en el ingreso de datos, además del manejo de un entorno gráfico para los perfiles longitudinales de los resultados.

El desarrollo del modelo computacional del modelo, consistió básicamente en tres etapas que se describirán a continuación:

En la primera etapa se analizaron los distintos términos de los modelos como los hidrodinámicos (velocidades, direcciones de flujo) y los términos de las características geométricas del canal.

En la segunda etapa se seleccionaron los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de los modelos, además de especificar las restricciones de cada uno, para ello se recurrió a diferentes técnicas de resolución que ofrecen los métodos numéricos, trabajando principalmente con sistemas discretizados asociados a geometrías complejas, permitiéndonos una aproximación a la solución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, en consideración con la geometría asociada.

En la tercera etapa se construyeron algoritmos computacionales para la resolución numérica del modelo, esto, realizado a través de software de programación Visual Basic. NET cuyo código o lenguaje computacional son de gran accesibilidad. Los algoritmos son de lenguaje abierto prestándose para posibles modificaciones o ajustes.

#### **4.4.1.1 Segmentación E Hidráulica**

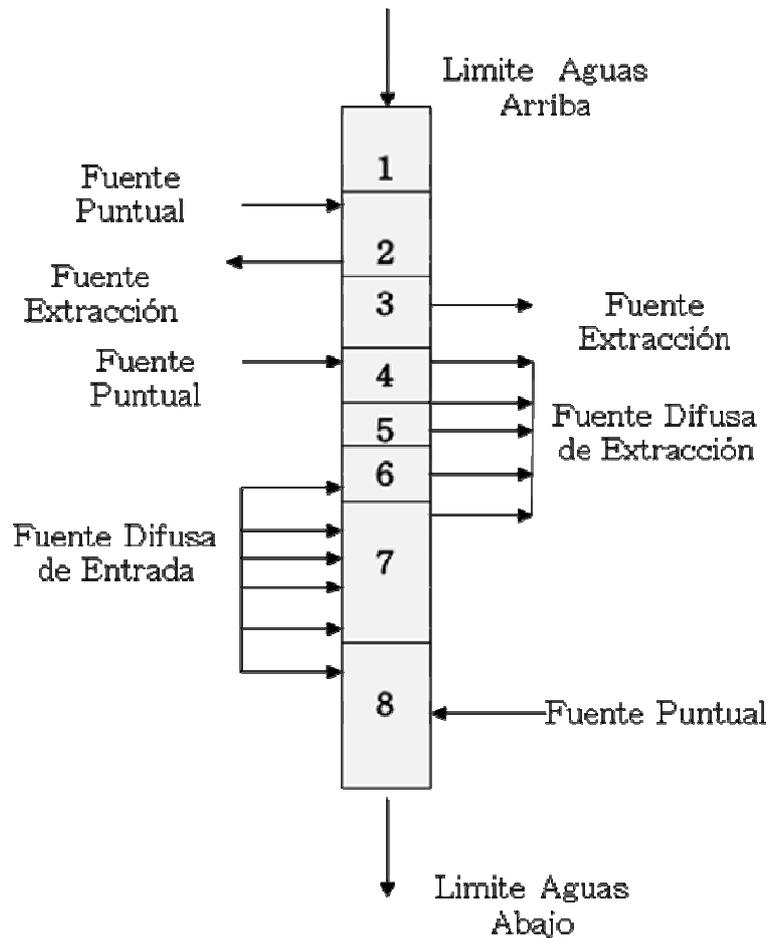
MOSIOD representa un río como un conjunto de series de alcances, representando los estiramientos del río que tienen características hidráulicas constantes. La Figura 7 muestra los alcances que son enumerados en orden ascendente iniciando de la cabecera del segmento a modelar del río. Las fuentes puntuales y difusas de entrada o extracción se pueden colocar en cualesquiera de los alcances a lo largo de la longitud de canal.

Cualquier alcance del modelo se puede dividir más a fondo en una serie de elementos espaciados equitativamente. En síntesis, la nomenclatura que utiliza el MOSIDO en cuanto a la topología y segmentación del río se organiza en:

- Alcance. Una longitud del río con características hidráulicas constantes.

- Elemento. La unidad de cómputo fundamental del modelo que consiste en una subdivisión igual de la longitud de un alcance.
- Segmento. Una colección de alcances que representan un tramo del sistema. Éstos consisten en el vástago principal así como cada tributario.
- Cabecera. El límite superior de un segmento modelo.

Figura 7. Esquema de la segmentación de MOSIOD para un río sin los tributarios.



#### 4.4.1.2 Características Hidráulicas

##### 4.4.1.2.1 Balance Del Flujo

El caudal juega un papel imprescindible en la simulación del oxígeno disuelto, pues presenta una serie de interrelaciones con los demás parámetros que influyen en la simulación. En tal sentido, La unidad fundamental del MOSIOD es el elemento y en él se encuentra el caudal. Para ello un equilibrio de estado estacionario del flujo se pone en ejecución para cada elemento del modelo como se muestra a continuación.

$$Q = Q_{i-1} + Q_{in,j} - Q_{out,j} \quad \text{Ecuación 1}$$

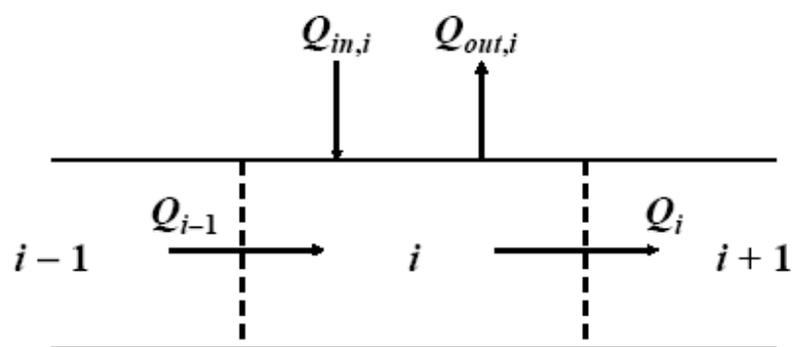
Donde

$Q_i$  = salida del elemento  $i$  en sentido descendiente  $i + 1$  ( $m^3/d$ ),

$Q_{i-1}$  = afluencia del elemento por aguas arriba  $i - 1$  ( $m^3/d$ ),

$Q_{in, i}$  es la afluencia total en el elemento de las fuentes puntuales y difusas ( $m^3/d$ )

$Q_{out, i}$  es la salida total del elemento debido a los retiros de fuentes puntuales y difusas ( $m^3/d$ ).



**Figura 8.** Balance del flujo del elemento.

La afluencia total de fuentes se computa como:

$$Q_{in,i} = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $Q_{ps}$ ,  $i, j$  es la sumatorias de las fuentes puntuales del elemento  $i$  ( $m^3/d$ ),  $psi$  = el número total de las fuentes puntuales al elemento  $i$ ,  $Q_{nps}$ ,  $i, j$  es la afluencia de la fuente difusas al elemento  $i$  ( $m^3/d$ ), y  $npsi$  = el número total de las afluencias de la fuentes difusas del elemento  $i$ .

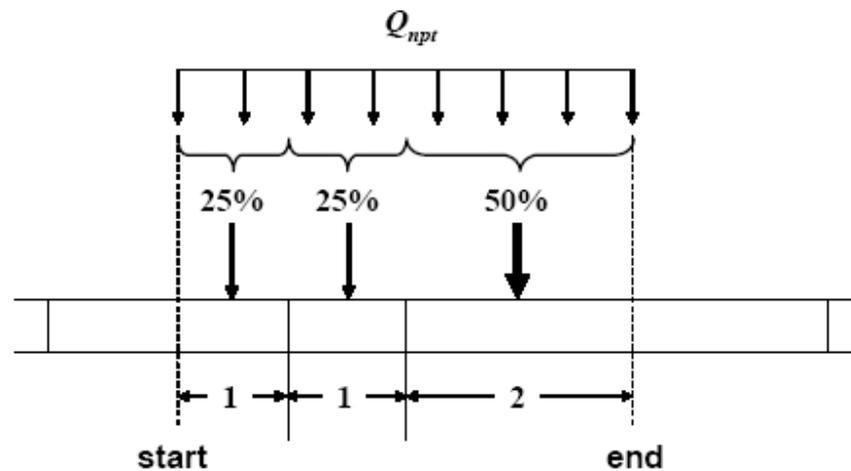
La salida total de retiros se computa como:

$$Q_{out,i} = \sum_{j=1}^{psi} Q_{pa,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{npa,i,j} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde está la salida  $Q_{pa}$ ,  $i, j$  del retiro de las fuentes puntuales del elemento  $i$  ( $m^3/d$ ),  $pai$  = el número total de los retiros de fuentes puntuales del elemento  $i$ ,  $Q_{npa}$ ,  $i, j$  es la salida del retiro de la fuentes difusas  $i$  ( $m^3/d$ ), y  $npai$  = el número total de los flujos del extracción de las fuentes difusas del elemento  $i$ .

Las fuentes y los retiros de las fuentes difusas se modelan como línea fuentes. La figura 9, muestra la fuente difusa demarcada por sus puntos del kilómetro que comienzan y que terminan. Su flujo entonces se distribuye a o desde cada elemento en una manera longitud-cargada.

**Figura 9.** La manera de la cual el flujo de las fuentes no puntuales se distribuye a un elemento.



Una vez que la salida para cada elemento se compute, la profundidad y la velocidad el programa calcula a partir de las condiciones anteriores utilizando la ecuación de Manning.

#### 4.4.1.2.2 Ecuación de Manning

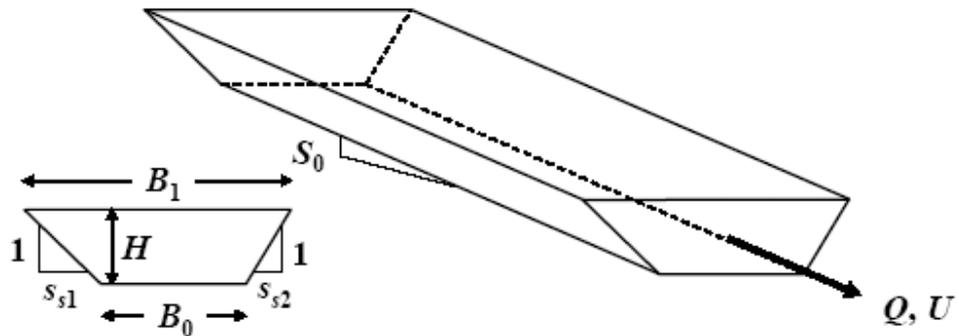
Cada elemento se idealiza como canal trapezoidal (Figura 10). Bajo condiciones del flujo constante, la ecuación de Manning se puede utilizar para expresar la relación entre el flujo y la profundidad como

$$Q = \frac{S_o^{1/2}}{n} \frac{A_c^{5/3}}{P^{2/3}}$$

Ecuación 4

Donde  $Q$  = flujo ( $m^3/s$ );  $S_o$  = pendiente inferior [ $m/m$ ];  $n$  = coeficiente de rugosidad de Manning;  $A_c$  = el área seccionada transversalmente; y  $P$  = el perímetro mojado

Figura 10. Canal Trapezoidal



El área seccionada transversalmente de un canal trapezoidal se computa como

$$A_c = [B_0 + 0.5(s_{s1} + s_{s2})H]H \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $B_0$  = anchura inferior [m];  $S_{s1}$  y  $S_{s2}$  = las dos cuestas laterales según lo demostrado en la Figura 4 [m/m]; y  $H$  = profundidad del elemento [m].

Se computa el perímetro mojado como

$$P = B_0 + H\sqrt{s_{s1}^2 + 1} + H\sqrt{s_{s2}^2 + 1} \quad \text{Ecuación 6}$$

Después sustituyendo Ecu. (5) y (6), Ecu. (4) puede ser solucionado iterativo para la profundidad (Chapra and Canale 2002),

$$H_k = \frac{(Qn)^{3/5} \left( B_0 + H_{K-1} \sqrt{S_{s1}^2 + 1} + H_{K-1} \sqrt{S_{s2}^2 + 1} \right)^{2/5}}{S^3 / 10 [B_0 + 0.5(s_{s1} + s_{s2})H_{k-1}]} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $k = 1, 2, \dots, n$ , donde  $n =$  el número de iteraciones. Una conjetura inicial de  $H_0 = 0$  es empleada. Se termina el método cuando el error estimado baja debajo de un valor especificado de 0.001%. Se calcula el error estimado como

$$\varepsilon_a = \left| \frac{H_{k+1} - H_k}{H_{k+1}} \right| \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

El área seccionada transversalmente se puede determinar con Eq. (5) y la velocidad se puede entonces determinar de la ecuación de la continuidad

$$U = \frac{q}{A_c} \quad \text{Ecuación 9}$$

La anchura media del elemento,  $B$  [m], se puede computar como

$$B = \frac{A_c}{H} \quad \text{Ecuación 10}$$

La anchura superior,  $B_1$  [m], se puede computar como

$$B_0 + (S_{s1} + S_{s2})H \quad \text{Ecuación 11}$$

El área superficial y el volumen del elemento se pueden entonces computar como

$$A_s = B_1 \Delta x \quad \text{Ecuación 12}$$

$$V = BH\Delta x$$

Ecuación 13

Los valores sugeridos para el coeficiente de Manning se enumeran en la tabla. El valor de  $n$  varía típicamente con flujo y profundidad (Gordon et al. 1992). Mientras que la profundidad disminuye en el flujo bajo, la rugosidad relativa aumenta. Los valores publicados típicos de  $n$  se extienden cerca de 0.015 para los canales lisos a cerca de 0.15 para los canales naturales rugosos, son representante de condiciones cuando el flujo está en la capacidad. (Rosgen, 1996).

Las condiciones críticas de la profundidad para la calidad del agua de evaluación son generalmente mucho menos que profundidad, y la rugosidad relativa puede ser mucho más alta.

**Tabla 2.** Coeficientes de la rugosidad de Manning para canales abiertos.

MATERIAL	$n$
Corrientes Naturales	
Limpios estrechos	0,025-0,004
Limpios, con régimen de viento arriba y abajo cobertura vegetal	0,03-0,05
Limpios con zonas de almacenamiento, forzantes de viento arriba	0,05
Corriente montañosa con lecho rocoso	0,04-0,1
Pendiente alta	0,05-0,02

Fuente: (chow et del al. 1988)

#### 4.4.1.3 Oxígeno Disuelto (OD)

En el modelo que se desarrollo tiene una modificación adaptada de la ecuación de Streeter & Phelps, 1925 y chapra, 2003 y considera para canales abiertos a la atmósfera el balance de masa para la DBO y Oxígeno Disuelto.se puede escribir como:

$$V \frac{dDBO}{dt} = -k_d V DBO \quad \text{Ecuación 14}$$

Y

$$V \frac{dO}{dt} = -K_d V DBO + k_a V (O_s - O) \quad \text{Ecuación 15}$$

Ahora antes de proceder con la solución, se realiza una transformación que simplifica el equilibrio del oxígeno. Para hacer esto se introduce una nueva variable,

$$D = O_s - O \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde  $D$  es llamado “*Déficit de Oxígeno Disuelto*”, y la Ecuación 16 puede ser diferenciada para dar,

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{dO}{dt} \quad \text{Ecuación 17}$$

La Ecuación 16 y la 17 puede ser sustituida en la Ecuación 15 para dar,

$$V \frac{dD}{dt} = K_d V DBO - K_a V D \quad \text{Ecuación 18}$$

Así el uso del déficit simplifica la ecuación diferencial (Chapra, 1997).

Supuestos, según Zaror 1998:

1.- Contaminante sin difusión  $D = 0$ .

2.- Estado Estacionario  $dC/dt = 0$ .

3.- Decaimiento de 1er orden (Ecuación 14).

Si  $DBO = DBO_0$  y  $D = 0$  a  $t = 0$ , las ecuaciones 14 y 18 pueden ser resueltas por,

$$DBO = DBO_0 e^{-k_d t} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$D = \frac{K_d DBO_0}{K_a - K_d} (e^{-K_d t} - e^{-k a t}) \quad \text{Ecuación 20}$$

Específicamente a la modelación de un río con una sola fuente puntual y continua de DBO. Se caracteriza a través de un reactor flujo pistón con hidrología y geometría constante. Ésta es la manifestación más simple del modelo clásico de *Streeter-Phelps, 1925*.

Donde el balance de masa se puede escribir como:

$$0 = -U \frac{dDBO}{dx} - K_r DBO \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde  $k_r = K_d + K_s$ . Si  $DBO = DBO_0$  y  $D = D_0$  a  $t = 0$ , estas ecuaciones pueden ser resueltas por (Chapra, 1997):

$$DBO = DBO_0 e^{\frac{-K_r}{U} x} \quad \text{Ecuación 22}$$

Y

$$D = D_0 e^{\frac{-K_d x}{U}} + \frac{K_d DBO_0}{k_d - k_r} \left( e^{\frac{-K_r x}{U}} - e^{\frac{-k_d x}{U}} \right)$$

Ecuación 23

Ahora, se aplica secuencialmente a una serie de tramos comprendidos entre fuentes o cursos de agua tributarios, adoptando los valores de  $DBO_0$  y  $D_0$  adecuado para cada tramo. En la Tabla 3, se indican las condiciones aguas debajo de un punto de vertido, en función de las condiciones de aguas arriba y de las características del vertido.

Tabla 3. Balance de Materia.

Parametro	Aguas Arriba del Vertido	Vertido	Aguas abajo del Vertido
Caudal	QX	QD	$Q = QX + QD$
DBO	DBOX	DBOD	$DBO_0 = (QX DBOX + QD DBOD)/Q$
Déficit de OD	DX	DD	$D_0 = (QX DX + QD DD)/Q$

Fuente (Metcalf, 1995)

#### 4.4.1.4 Oxígeno Saturación

La siguiente ecuación se utiliza para representar la dependencia de la saturación de oxígeno de la temperatura (APHA 1992)

Ecuación 24

$$\ln O_2(T, O) = -139.34411 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T_a^2} + \frac{1.243800 \times 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T_a^4}$$

Finalmente, el Oxígeno disuelto en una corriente superficial se encuentra establecido como:

$$O = O_s - D \quad \text{Ecuación 25}$$

#### 4.4.1.5 Constantes Cinéticas de Reareación

La estimación de la constante cinética de primer orden para la transferencia de oxígeno desde el aire  $k_a$ , se realiza a partir de varios modelos a 20°C:

El coeficiente de reareación (a 20 °C) puede ser especificado en el modelo de alcance. Si la reareación no está prescrito (es decir, que es en blanco o nulo para un alcance), se calcula en función de la hidráulica del río y (opcionalmente) la velocidad del viento.

$$K_a(20) = K_{ah}(20) + \frac{K_{LW}(20)}{H} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde  $k_{ah}(20)$  = la reareación tasa a 20 °C calculado sobre la base de las características hidráulicas del río [ó - 1],  $K_L(20)$  = la reareación masa coeficiente de transmisión basada en la velocidad del viento [h / d], y  $H$  = Profundidad media [metros].

- *O'Connor-Dobbins (O'Connor and Dobbins 1958)*

$$k_a(20) = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde  $U$ = velocidad (m/s) y  $H$ = Profundidad (m)

- *Churchill (Churchill y otros, 1962)*

$$K_{ah}(20) = 5.026 \frac{U}{H^{1.67}} \quad \text{Ecuación 28}$$

• Owens-Gibbs (Owens y otros, 1964)

$$K_{a\alpha}(20) = 5.32 \frac{v^{0.67}}{H^{1.85}}$$

Ecuación 29

**Tabla 4.** Variación de velocidades y profundidades para flujos aireados a 20°C.

Parámetros	O'Connor-Dobbins	Churchill	Owens-Gibbs
Profundidad (m)	0,30-9,9	0,61-3,35	0,12-0,73
Velocidad (m/s)	0,15-0,49	0,55-1,52	0,03-0,55

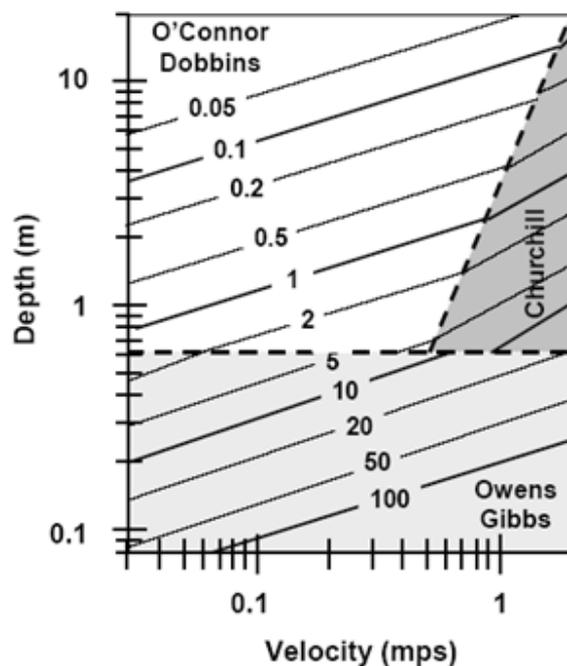
(Fuente: Chapra, 1997)

- *Interna (Covar 1976):*

La Reareación también pueden ser internos y se calcula en base al siguiente esquema, elaborado por Covar (1976) (Figura 11):

- Si  $H < 0,61$  metros, utilizar la fórmula de Gibbs - Owens
- Si  $H > 0,61$  M y  $H > 3.45U^{2.5}$ , use la fórmula O'Connor - Dobbins
- En caso contrario, debe utilizarse la fórmula Churchill. Esto se conoce como opción Interna.

**Figura 11.** Rata de Reareación (1/d) Vs Profundidad y Velocidad. (Covar, 1976).



La cuantificación de los valores de los parámetros del modelo se realiza durante una calibración a priori, usando los valores de literaturas (teóricas y experimentales), que corresponden con la situación específica del sistema en estudio. A continuación, se presentan los diferentes valores reportados por la literatura para los coeficientes de las constantes de reareación.

**Tabla 5.** Coeficientes de aireación de 1er orden, para distintos ríos a 20°C.

Coeficientes ka	valor	Unidades	Referencia
ríos lentos profundos	0.1-0.4	1/d	Schnoor (1996), Tabla 6.3, p.246
ríos condiciones típicas	0.4-1.5	1/d	Schnoor (1996), Tabla 6.3, p.246
ríos veloces, profundos	1.5-4.0	1/d	Schnoor (1996), Tabla 6.3, p.246
ríos veloces, poco profundos	4.0-10.0	1/d	Schnoor (1996), Tabla 6.3, p.246

(Fuente: Chapra, 1997)

La estimación de la constante cinética de primer orden para el consumo de oxígeno por acción metabólica  $k_d$ , se realiza a partir de la tendencia expresada por Hydrosience, 1971 a 20°C (Chapra, 1997):

$$K_d = 0,3 \left(\frac{H}{8}\right)^{-0,434}$$

Ecuación 30

$$0 \leq H \leq 2.4 \text{ m}$$

$$K_d = 0,3$$

$$H > 2.4 \text{ m}$$

**Tabla 6.** Coeficientes de descomposición de 1er orden, para distintos ríos a 20°C.

Coeficientes $k_d$	valor	Unidades	Referencia
sin previo tratamiento	0.35 (0.20-0.50)	1/d	Chapra (1997), Tabla 9.1, p.357
tratamiento primario	0.20 (0.10-0.30)	1/d	Chapra (1997), Tabla 9.1, p.357
lodo activado	0.075 (0.05-0.10)	1/d	Chapra (1997), Tabla 9.1, p.357
más sedimentación	0.5-5	1/d	Schnoor (1996), Tabla 6.3, p. 246

(Fuente: Chapra, 1997)

Las fórmulas basadas en el viento: Hay tres opciones disponibles para incorporar los efectos del viento en la tasa reareación: (1) que puede ser omitido, (2) la fórmula de Bancos - Herrera y (3) la Wanninkhof fórmula.

Banks-Herrera formula (Banks 1975, Banks and Herrera 1977):

$$K_{lw} = 0.728U_{w,10}^{0.5} - 0.317U_{w,10} + 0.317U_{w,10}^2$$

Ecuación 31

Donde  $U_{w, 10}$  = velocidad del viento mide 10 metros por encima de la superficie del agua [m/s]

Wanninkhof formula (Wanninkhof 1991):

$$k_{lw} = 0.0986 U_{w,10}^{1.64} \quad \text{Ecuación 32}$$

#### 4.4.1.6 Efecto de la temperatura.

Mediante un balance de calor para la temperatura de mezcla, se obtiene la temperatura mezcla del río.

$$T = \frac{[(Q_{rio}) + (Q_{fp} * T_{fp}^0)]}{[Q_{rio} + Q_{fp}]} \quad \text{Ecuación 33}$$

Tanto la transferencia de oxígeno como la tasa de eliminación de la DBO, son influenciadas por la temperatura del medio. Esto se estudia con la relación de Van't Hoff-Arrhenius (Metcalf, 1995).

$$K_a = K_{a,20^{\circ}C} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 34}$$

Y

$$K_d = K_{d,20^{\circ}C} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 35}$$

**Tabla 7.** Factores  $\Theta$ , para la obtención de las constantes cinéticas reales.

$\Theta_a$	1.005-1.030	Thomann and Mueller (1987), p.282
	1.024	Chapra (1997), p.377
	1.024	Schnoor (1996), Table 6.3, p. 246
	1.024-1.037	Schnoor (1996), Table 3.1, p.98
$\Theta_d$	1.048	Schnoor (1996), p. 238; Table 6.3, p. 246
	1.047	Schnoor (1996), Table 3.1, p.98
	1.04 (1.02-1.09)	Thomann and Mueller (1987), p.297

(Fuente: Metcalf, 1995)

#### 4.4.2 Alimentación del modelo

La resolución numérica del modelo es producto de los valores que se ingresen al mismo. El modelo que se desarrollo necesitara de dos conjuntos de datos para desarrollar los cálculos. Estos incluyen:

##### 4.4.2.1 Características hidráulicas y fisicoquímicas de la corriente.

A partir de la profunda revisión bibliográfica de todos los registros hidráulicos, hidrológicos y fisicoquímicos de la cuenca, dicha revisión se fundamenta principalmente en dos estudios efectuados en el rio Manzanares, titulados i) *Caracterización Hidrológica De La Cuenca Del Río Manzanares Y Evaluación De Su Disponibilidad Hídrica* (De Arco y De león, 2006). ii) *Simulación De La Calidad Del Agua Del Río Manzanares Utilizando El Modelo Qual2k* (GUIZAO Y DÍAZ, 2007).

Dentro del paquete de datos necesarios para alimentar el modelo se encuentra las fuentes puntuales y difusas del río, puesto que un modelo de calidad de aguas pueda ser aplicado confiablemente, para la predicción de las condiciones de los

diversos parámetros, tiene que cumplir, obviamente, con la condición básica de reproducir aceptablemente las condiciones actuales. Por tal motivo, en aras de establecer parámetros de referencia que permitan evaluar y distinguir dichas características nos remitiremos al inventario de fuentes puntuales y difusas utilizado en la simulación del río manzanares con el cual 2k por Guizao y Díaz, 2007.

#### **4.4.2.1.1 Inventario De Fuentes Puntuales Y Quebradas**

El inventario de fuentes de descargas puntuales, puntos de extracción y afluentes, constituye uno de los elementos más importantes en la alimentación del modelo, para ello se efectuó un recorrido a lo largo de los márgenes del río con el ánimo de identificarlos espacialmente y tener correspondencia con los datos presentados en el trabajo de Guizao y Diaz, 2007. Las seis (6) fuentes puntuales o puntos de entrada de contaminación al río Manzanares, se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8.** Inventario de fuentes puntuales y quebradas.

NOMBRE DE LA FUENTE	TIPO DE FUENTE	LOCALIZACIÓN		LOCALIZACIÓN (Km)
		N	W	
Quebrada Matogiro	Quebrada	11° 14' 15''	74° 07' 06''	1.05
Caño de ARD en Bonda	Puntual	11° 14' 24''	74° 07' 39''	1.925
Quebrada Veracruz	Quebrada	11° 14' 26''	74° 08' 28''	4.075
Quebrada mojada	Quebrada	11° 14' 14''	74° 08' 49''	4.45
Quebrada seca	Quebrada	11° 14' 08''	74° 08' 58''	4.95
Quebrada Tamacá	Quebrada	11° 13' 48''	74° 12' 27''	15.075

Fuente: Guizao y Díaz, 2007

- *Punto de afluencia quebrada matogiro.*

Esta quebrada es la primera fuente que entra al sistema a partir de la cabecera del tramo desemboca a una distancia de 1.05 km, dicho afluente se encuentra a una longitud aproximada de 100 metros aguas abajo del puente de Bonda. El aporte de agua al río Manzanares es permanente aún en los periodos extremadamente secos, Los registros de caudales presentados por la empresa de servicios públicos METROAGUAS S.A. reportan valores cercanos a 1 m<sup>3</sup> en invierno, razón por la cual convierte a dicha quebrada como la fuente más representativa en la dinámica hidrológica de la corriente.

El agua que se encuentra en tránsito en la quebrada Matogiro presenta condiciones organolépticas bastante aceptables, pues su apariencia cristalina muestra gran capacidad de auto purificación, pues el impacto negativos asociado a algunas porquerizas y criaderos de pollos que descargan aguas residuales generadas en esta clase de explotaciones pecuarias. No es significativo, al no ser un vertimiento directo, si no sobre suelos cercanos a la quebrada, pero finalmente estas aguas escurren hasta llegar a su lecho. No obstante la quebrada desemboca al río Manzanares con un Oxígeno Disuelto (OD) de 6.45 mg/l durante época de estiaje; valor cercano a 8 mg/l que es el nivel de saturación, para destacar encontramos que fue la zona que presento mayor presencia de rocas por lo cual nos hace considerar que presumiblemente el lecho rocoso influye circunstancialmente en el valor que presenta la muestra en dicha estación.

- *Punto de Afluencia Caño de Aguas Residuales Domésticas en Bonda.*

Ubicado a 1.9 km aguas debajo de la afluencia de la quebrada de matogiro. Dicho punto aporta un caudal aproximado de 0.2 m<sup>3</sup>/s al río Manzanares en invierno (METROAGUA S.A), de las características para destacar del tributario, encontramos cualitativamente que es uno de los más contaminados puesto que la

población aledaña al río aporta aguas grises. Dicha situación ocasiona que en el periodo verano las descargas de aguas grises, no permitan que se seque el caño, el cual presenta niveles de OD bajos (cerca de 3 mg/l) y una DBO aproximada de 50 mg/l.

- *Punto de Afluencia Quebrada Veracruz*

Ubicada a 4.1 Km aguas abajo de la cabecera de la modelación se ubica la quebrada Veracruz. La corriente presenta un olor desagradable producido presumiblemente por la descarga de aguas residuales de la planta procesadora de pollos HUCANA. En el verano la quebrada puede llegar a tener niveles bajos de agua, mientras en el periodo de lluvias se registró un caudal de 20 l/s. El oxígeno disuelto es de alrededor de 6 mg/l y la DBO es de 30 mg/l aproximadamente, lo que demuestra que el cuerpo tiene algún grado de contaminación.

- *Punto De Afluencia Quebrada Mojada*

Ubicada a los 4.45 km desde el tramo inicial, es un afluente relativamente grande con un caudal aproximado de 180 l/s en periodo de lluvias. Este reviste gran importancia porque es el cuerpo hídrico que pasa con mayor aproximación al antiguo botadero de basuras de Veracruz y es probable que una pequeña parte de los lixiviados producidos al interior de este escurran hasta llegar al lecho de la quebrada contaminándola.

- *Punto De Afluencia Quebrada Seca*

Es uno de los afluentes que aporta mayor caudal al río Manzanares. Se registró un caudal de 223 l/s en periodo de invierno. También presenta problemas de contaminación reflejados en una DBO de 25 mg/l y OD de 4.5 mg/l en promedio.

- *Punto de afluencia quebrada tamacá.*

La quebrada Tamacá se puede considerar como una fuente puntual de contaminación ya que esta recolecta aguas residuales de algunas viviendas ubicadas en los barrios El minuto de Dios, La Lucha y Curínca, que luego desembocan al río Manzanares. Además de transportar aguas residuales domésticas la quebrada Tamacá recolecta grandes cantidades de residuos sólidos a su paso por los diferentes barrios mencionados anteriormente, los residuos sólidos son arrastrados hasta el cauce del río Manzanares y finalmente a la bahía de Santa Marta. Durante el verano este riachuelo puede llegar a secarse mientras en invierno puede tener un caudal bastante alto.

#### 4.4.2.1.2 Inventario de Fuentes Difusas.

Siguiendo la misma metodología de las fuentes puntuales se optó que en el tramo a simular con MOSIOD, se establecieran los mismos parámetros. Durante la inspección del tramo a simular se establecieron dos fuentes difusas, las cuales se muestran en la tabla 9. Estas corresponden a los trayectos donde ocurren las descargas de aguas residuales domésticas, las cuales son muy difíciles de identificar individualmente en lo referente a su localización y caudal, mientras agrupándolas es más fácil de ubicarlas espacialmente y de calcular su caudal. Para esto último se contó el número de viviendas y se efectuó el cálculo, a las cuales se le asignó una dotación neta de 150 l/hab/d y un coeficiente de retorno del 5%.

**Tabla 9.** Inventario de fuentes difusas.

NOMBRE	LOCALIZACIÓN				CAUDA L (m <sup>3</sup> /s)	DBO (mg/l)	OD (mg/l)	pH
	DESDE		HASTA					
	N	W	N	W				
Difusa 1	11°13'57''	74°10'45''	11°13'52''	74°12'5''	0.1	180	2	7.3
Difusa 2	11°14'14''	74°13'01''	11°14'20''	74°13'25''	0.01	180	2	7.3

Fuente: Guizao y Díaz, 2007

La primera fuente difusa empieza en el barrio las Malvinas y se extiende aguas abajo hasta el puente ubicado sobre la avenida del ferrocarril.

La segunda fuente difusa se inicia en el puente de la cuarta y termina en la desembocadura del río en la bahía de Santa Marta. Para las simulaciones se utilizaros valores de OD, DBO y pH correspondientes a aguas residuales doméstica típicas.

#### **4.4.2.1.3 Inventario de Puntos de Extracción.**

En la Tabla 10 se muestran los (2) dos puntos de extracción que se ubicaron durante el desarrollo de la presente investigación. Estos puntos corresponden a estructuras que fueron construidas sobre el lecho del río Manzanares con el fin de aumentar la recarga del acuífero de Santa Marta. Los datos de los caudales fueron proporcionados por METROAGUA empresa que presta el servicio de acueducto y alcantarillado en la ciudad.

**Tabla 10.** Inventario de puntos de extracción

<b>NOMBRE</b>	<b>LOCALIZACIÓN AGUAS ABAJO (Km)</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>
Recarga 1	10.3	0.17
Recarga 2	10.93	0.17

Fuente: Guizao y Díaz, 2007

#### **4.4.2.2 Variables conceptuales y Constantes cinéticas**

Los datos que se van a introducir serán producto de la revisión exhaustiva de estudios de la comunidad científica y manuales de modelos ya existentes en el mercado.

#### **4.4.3 Calibración y validación**

La fase de calibración tiene por objetivo forzar a que el modelo reproduzca en mayor o menor grado la respuesta del sistema real. (Cox, 2003).

El proceso calibración y comparación de datos observados en terreno, con datos obtenidos por el modelo desarrollado, consistirá en ajustar los valores numéricos de los parámetros de tal forma de reducir al mínimo la diferencias entre los datos reales y las predicciones del modelo bajo condiciones comparables, para esto se utilizaran datos obtenidos por muestreos realizados por la empresa de servicios públicos Metroaguas S.A., Además, se contara con datos de estudios asociados al cuerpo de agua, dentro de los que se destaco; tesis de grado de Ingeniería Ambiental y Sanitaria “La simulación de la calidad del agua del río Manzanares utilizando el modelo Qual 2K”.

La Validación se realiza una vez ya calibrado el modelo, aquí se comprueba la capacidad predictiva del modelo, en base a observaciones no utilizadas en la calibración. (Cox., 2003). En tal sentido, se alimentará el modelo con un segundo paquete de datos de campo correspondiente a otro régimen climático. No obstante, se evaluarán las variaciones que presentan los resultados al alterar algunos parámetros del modelo. Efectuando un análisis de sensibilidad indicando los márgenes dentro de los cuales el modelo es confiable, es decir, estableceremos los valores críticos donde los valores simulados dejan de corresponder con los reales, Apoyándonos en el uso de estadísticos simples como el error cuadrático medio, el error absoluto medio.

#### 4.5 Escenarios de Simulación

**Simulación:** Una vez validado el modelo, se ejecutará el mismo para predecir información sobre la concentración del Oxígeno Disuelto del Río Manzanares. Entre los escenarios de predicción se plantean.

**Escenario 1:** Disminución y aumento en % del caudal del río. Lo cual representara la influencia del comportamiento Hidráulico (Caudal y Velocidad), en la concentración de Oxígeno Disuelto.

**Escenario 2:** Vertimientos de Carga Contaminantes en tres etapas: a) Sin vertimientos, b) Vertimiento actual, c) Vertimientos futuro. Lo cual representará los efectos que la carga de contaminantes tienen sobre la variación de oxígeno en el río manzanares.

## 5 RESULTADOS Y ANALISIS DE SIMULACIONES

### 5.1 MODELO CONCEPTUAL

#### 5.1.1 Representación conceptual del Oxígeno Disuelto.

La representación conceptual comprende una idealización gráfica del prototipo, considera la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas y la identificación de las condiciones de borde e interrelaciones entre las partes del prototipo. (Loucks et al., 1982).

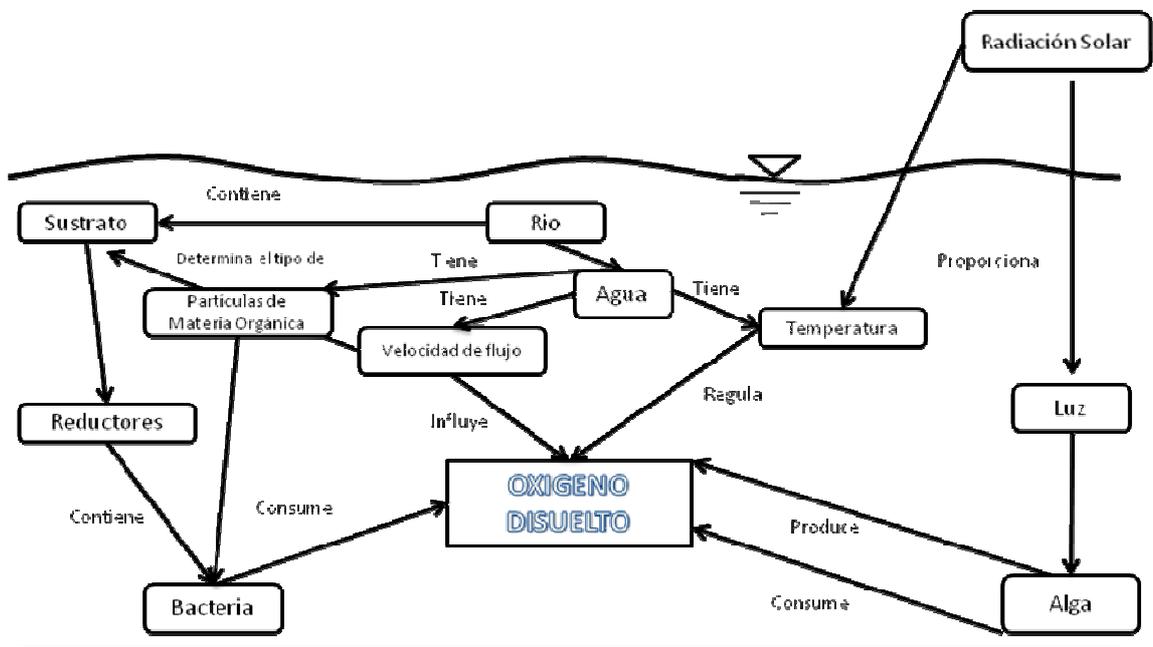
Uno de los parámetros indicativos del ecosistema acuático es la cantidad de oxígeno disuelto (OD) en el agua. El Oxígeno es un componente esencial para todo organismo viviente en el ecosistema acuático. Todo cuerpo de agua contiene alguna cantidad de OD debido a la difusión por la atmósfera. Hay normalmente un equilibrio dinámico entre las entradas y salida de OD debido a proceso biológico de la producción y consumo de oxígeno. La contaminación del agua, abstracción, erosión y otras actividades del humano puede romper este equilibrio, empeorando la salud del ecosistema y disminuyendo los usos sustentables de servicios del ecosistema.

La conceptualización del modelo se fundamenta en una evaluación emprendida a través de los modelos conceptuales, más importantes y reconocidos, actualmente para describir la calidad de agua en sistemas de río de agua dulce. Entre los que se destaca, el modelo de QUAL2Kw (Pelletier and Chapra, 2005), QUAL2K (Chapra, 2003), QUAL2E (Brown and Barnwell, 1987), QUAL - II (Roesner et al., 1981), WASP5 (Ambrose et al., 1987), CE-QUALW2, STREAM (Park and Lee, 1996), DYRES M (Hamilton and Schladow, 1997), SIREM1 (Park and Uchrin, 1997), QUASAR (Whitehead et al., 1997), MIKE 11 (Abbott et al., 1986).

El modelo conceptual nos ayuda a identificar, clarificar y enfocar nuestro conocimiento sobre el sistema de interés (Figura 12). Existen dos grupos

principales que influyen en los procesos de OD. Los procesos físicos involucran radiación solar que proporciona la luz y calor, así como el agua el que modifica las condiciones hidráulicas del cauce (la profundidad, la anchura, el fondo, los substratos, etc.), proporcionando los hábitats de los organismos vivos. Los procesos biológicos involucran tres grupos de organismos responsables de la producción de oxígeno (productores: las algas) y el consumo de oxígeno (los consumidores y reductores).

**Figura 12.** Modelo Conceptual del río Manzanares.



### Principales Procesos Internos

La difusión de oxígeno es un proceso físico que involucra el agua, que tiene cantidad de Temperatura, OD, la intensidad de Luz, y cantidad de Calor. El OD disminuye a partir del aumento de la temperatura en el agua del río y durante verano. Las descargas de contaminación termal (el efluente de aguas refrigerantes de las plantas termales para la producción de energía y otras industrias) puede reducir substancialmente el OD en el río.

La aeración es un proceso físico que involucra el agua y las cantidades de OD y velocidad de flujo. La difusión de oxígeno por el aire se facilita por turbulencia del movimiento de agua. Esta turbulencia mezcla aire y agua y así incrementa la cantidad de oxígeno disuelto por ésta mezcla. La turbulencia es más alta cuando la velocidad de flujo es superior y también en aguas superficiales.

El substrato del lecho de río es un proceso físico que involucra el flujo, agua, lecho del Río, y Substratos con las cantidades velocidad del Flujo y Tamaño de partículas del substrato (granulometría). La energía cinética de la corriente modifica la composición del lecho del río y por ende la velocidad, las partículas clasificadas según su tamaño forman el fondo del lecho, de las cuales las partículas más grandes (como las piedras y arena gruesa) proporcionan más superficie para que habiten organismos vivos.

La Producción de oxígeno es un proceso biológico que involucra la Luz, Algas y la intensidad de luz, el número de algas, tasa fotosintética, y OD. La luz de la radiación solar es el factor primario para la producción de oxígeno a través del proceso de fotosíntesis por las algas. La contaminación y erosión debido al efluente orgánico y/o inorgánico de las partículas reducen la penetración de la luz y así la proporción de fotosíntesis (tasa fotosintética).

El Consumo de oxígeno (la respiración) es un proceso biológico que involucra todos los organismos vivientes (las Bacterias, las Algas). Todos los organismos acuáticos consumen OD para su respiración disminuyendo su concentración en el agua, siendo el incremento en la temperatura del agua la causa del aumento en la tasa de consumo.

Alimentación es un proceso biológico que involucra las entidades Algas y Bacterias, incluyendo la cantidad de cada uno. Los rascadores son invertebrados acuáticos que raspan (o rozamiento) la capa delgada de algas y bacterias (llamada bio-película) en los substratos de la superficie. La cantidad de los

rascadores dependen de la cantidad y disponibilidad de su presa. El proceso siempre es activo con tal de que la comida esté disponible (las algas y bacterias). La alimentación se relaciona positivamente a la temperatura del agua y la tasa de consumo de oxígeno. Los impactos externos como la contaminación pueden influir en el proceso negativamente cambiando la cantidad de la comida.

La degradación bacteriana es un proceso que involucra las bacterias, Agua y las cantidades de bacterias, OD y Cantidad de POM (partículas de materia orgánica). La degradación Bacteriana involucra la descomposición de la materia orgánica de los organismos muertos y entradas de la vertiente. La cantidad de la bacteria depende fuertemente de la cantidad de POM en el cuerpo agua. La entrada de POM por agua residual urbana e industrial acelera la degradación hasta que el OD está completamente agotado.

### **5.1.2 Segmentación Hidráulica**

La segmentación del MOSIOD para el Rio Manzanares, se encuentra representada por 7 elementos, que componen a su vez un alcance de 17,50 Km, donde cada segmento está definido por los seis (5) tributarios (Quebrada Matogiro, Veracruz, Mojada, seca y Tamaca) y un vertimiento directo (Canal de agua residual de Bonda) que conformarían las fuentes puntuales, de igual manera son considerados los vertimientos domésticos que se presentan en la parte baja del rio (vertimientos de los Barrios: las Malvinas, las Vegas, Avenida del Rio Puerto Mosquito) que conforman a la vez las fuentes difusas.

**Figura 13.** Esquema de la segmentación de MOSIOD para el Río Manzanares

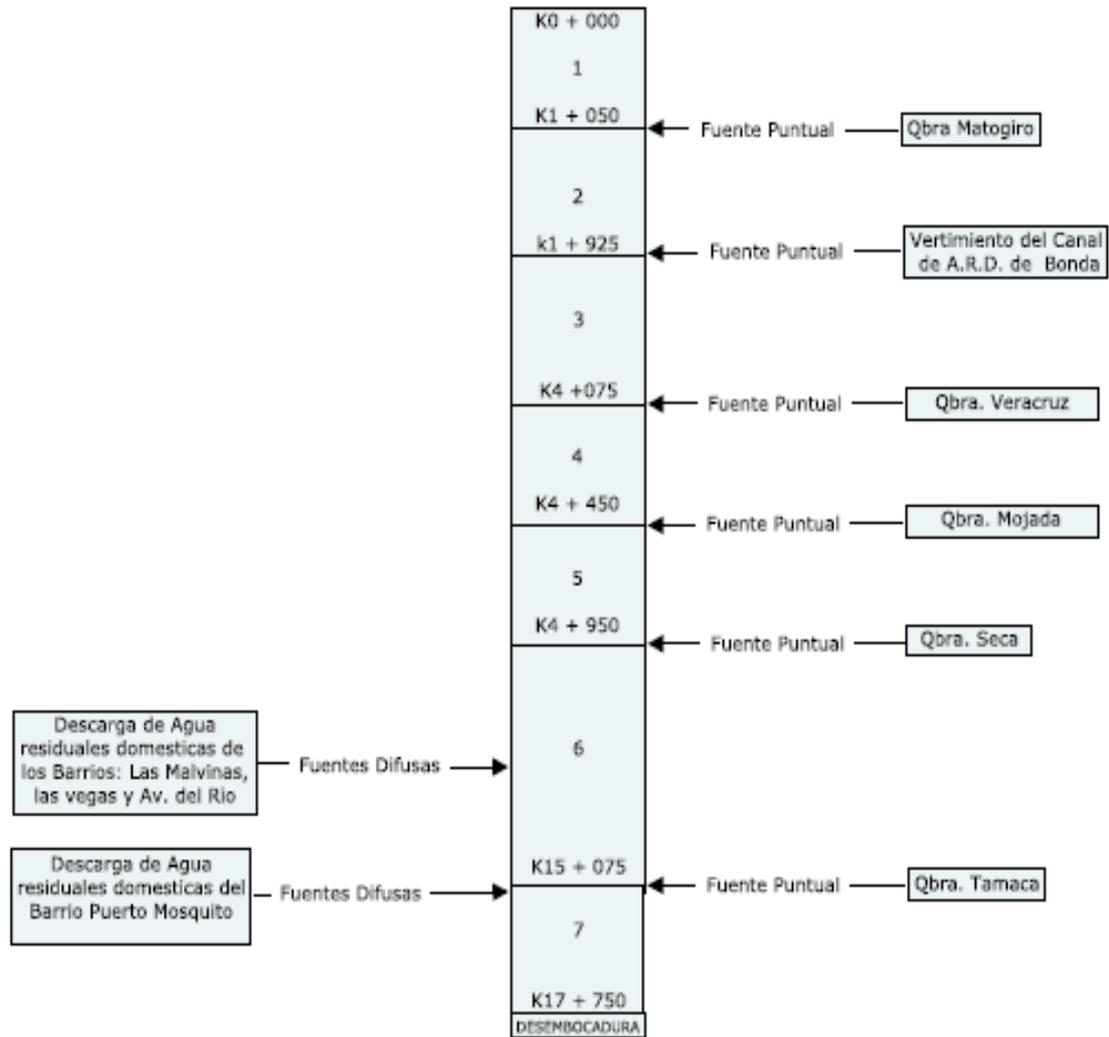
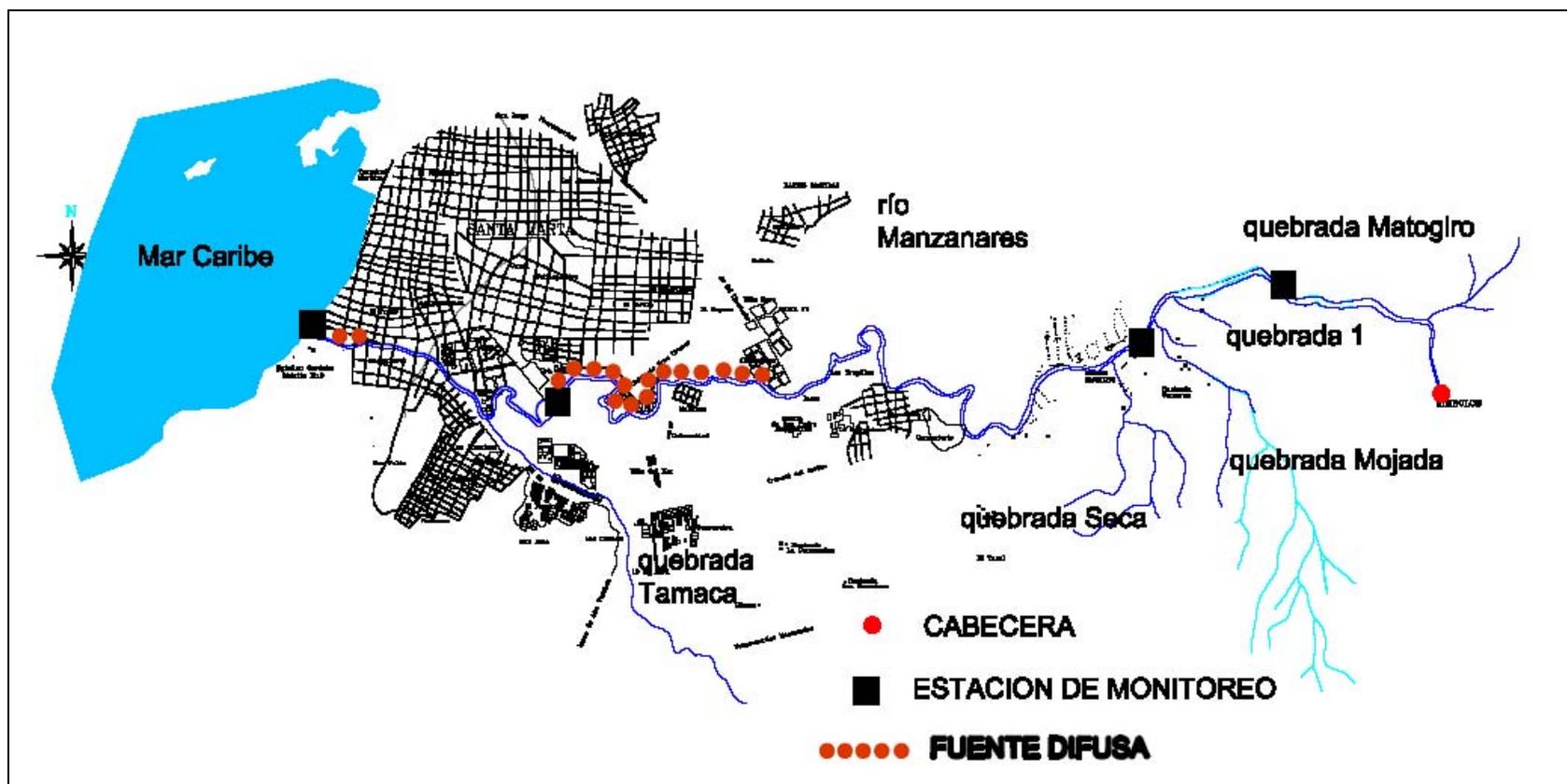


Figura 14. Distribución de las fuentes y estaciones de Monitoreo del Río Manzanares.



Fuente: Elaboración Investigadores

## **5.2 MODELO COMPUTACIONAL**

### **5.2.1 Postulación e Implementación del MOSIOD**

El MOSIOD al estar fundamentado en la ecuación del modelo de Streeter-Phelps, requiere de muchas variables y parámetros las cuales fueron identificadas, y posteriormente programadas en Visual Basic. NET. Es así que fue necesario realizar una serie corridas del modelo, comparadas pruebas de escritorio que permitan constatar los valores presentados por el MOSIOD, esta operación permitió establecer la confiabilidad y depuración de los resultados. Para alimentar el programa basado en la modelación del Río Manzanares con el qual 2k.

**Tabla 11.** Valores ingresados en MOSIOD frontera aguas arriba (Julio de 2005)..

<b>HORA DE MUESTREO</b>	<b>OD (mg/l)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>CONDUCTIVIDAD (umhos)</b>	<b>pH</b>
12:00 a.m.	7.55	3.3	165	7.29
01:00 a.m.	7.55	3.4	162	7.3
02:00 a.m.	7.56	3.46	160	7.29
03:00 a.m.	7.56	3.4	160	7
04:00 a.m.	7.55	3.48	163	7.3
05:00 a.m.	7.55	3.55	164	7.3
06:00 a.m.	7.54	3.53	166	7.3
07:00 a.m.	7.53	3.58	166	7.3
08:00 a.m.	7.51	3.61	166	7.3
09:00 a.m.	7.5	3.61	166	7.3
10:00 a.m.	7.52	3.64	167	7.26
11:00 a.m.	7.5	3.64	166	7.28
12:00 p.m.	7.51	3.67	168	7.31
01:00 p.m.	7.5	3.68	167	7.3
02:00 p.m.	7.49	3.68	168	7.3
03:00 p.m.	7.48	3.68	168	7.28
04:00 p.m.	7.5	3.7	167	7.29
05:00 p.m.	7.5	3.64	166	7.31
06:00 p.m.	7.51	3.63	164	7.3
07:00 p.m.	7.53	3.61	165	7.31
08:00 p.m.	7.54	3.59	164	7.3
09:00 p.m.	7.55	3.51	165	7.31
10:00 p.m.	7.55	3.51	165	7.29
11:00 p.m.	7.55	3.5	165	7.29
11:00 p.m.	7.55	3.5	165	7.29
<b>MÁXIMO</b>	7.56	3.7	168	7.31
<b>MÍNIMO</b>	7.48	3.3	160	7
<b>PROMEDIO</b>	7.53	3.57	165.13	7.28

De los resultados de las condiciones aguas arriba tomados y procesados por (Guizao y Diaz, 2007) durante julio de 2005, presentan concordancia con los valores presentados en la literatura respecto a corrientes naturales conservadas.

Por otra parte, la Tabla 12 presenta la caracterización de los parámetros de los afluentes y los datos de campo de 4 estaciones que son utilizados para la calibración del modelo.

**Tabla 12.** Caracterización de parámetros de los afluentes (Julio de 2005).

<b>NOMBRE</b>	<b>LOCALIZACIÓN (Km)</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>CONDUCT (umhos)</b>	<b>OD (mg/l)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>pH</b>
Quebrada Matogiro	1.05	0.4	383	6.45	5.2	7.5
Quebrada Q ARD	1.93	0.2	367	3.1	50.1	7.25
Quebrada Veracruz	4.75	0.02	552	6.55	3.53	7.42
Quebrada Mojada	4.45	0.183	625	6.5	18	7.7
Quebrada Seca	4.95	0.223	178	4.5	25.2	7.4
Quebrada Tamacá	15.08	0	-	-	-	-

NOTA: Durante este periodo la quebrada Tamaca se encontraba seca.

**Tabla 13.** Caracterización de la calidad del agua en cuatro (4) estaciones de monitoreo a lo largo del tramo simulado. (Julio de 2005).

<b>LOCALIZACIÓN (Km)</b>	<b>COND (UMHOS)</b>	<b>OD (mg/l)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>PH</b>
2.78	266	6	20	7.1
4.55	375	6	15	6.8
13.9	420	5	24	7.2
17.5	600	3	25	7.1

### 5.2.2 Calibración de MOSIOD

El modelo fue calibrado con los datos cargados de los resultados de las muestras correspondiente al periodo seco del año 2006, para ello se le halló a los resultados el RMS (error de la raíz media cuadrática), con el fin de establecer el error entre lo simulado por MOSIOD y lo obtenido por el qual2k.

El error Medio Cuadrático se calculo basado en la fórmula propuesta por Kennedy y Neville (1976).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{N}}$$

Ecuación 36

A partir de las simulaciones efectuadas y progresivo cálculo del error medio Cuadrático, el modelo se consideró calibrado cuando fue inferior al 5% del valor presentado por el Qual2k, obteniendo 0.12 % equivalente a 0.007 mg/L.

### 5.2.3 Validación de MOSIOD

La validación del MOSIOD, se efectuó al simular las condiciones de periodo de lluvias representado por los datos de campo del mes de mayo de 2006, presentados en la simulación del Río Manzanares con el Qual2k por (Guizao y Díaz, 2007). A Continuación presentamos los resultados de la caracterización de la calidad del agua en la frontera aguas arriba, en los afluentes y en las estaciones de monitoreo se presentan en las Tablas 15, 16 y 17 respectivamente.

**Tabla 14.** Valores ingresados en MOSIOD frontera aguas arriba (Mayo de 2006).

HORA DE MUESTREO	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	CONDUCTIVIDAD (umhos)	pH
12:00 a.m.	7.5	5.6	164	7.3
01:00 a.m.	7.52	6.8	160	7.4
02:00 a.m.	7.55	5.4	160	7.3
03:00 a.m.	7.56	5.2	160	7
04:00 a.m.	7.53	5.2	162	7.4
05:00 a.m.	7.54	5.6	163	7.3
06:00 a.m.	7.55	6.5	167	7.2
07:00 a.m.	7.5	6.4	166	7.2
08:00 a.m.	7.51	6.8	166	7.2
09:00 a.m.	7.51	6.4	166	7.3
10:00 a.m.	7.5	6.9	167	7.3
11:00 a.m.	7.5	7.3	167	7.2
12:00 p.m.	7.52	7.2	168	7.2
01:00 p.m.	7.56	6.8	167	7.2
02:00 p.m.	7.49	6.1	168	7.28
03:00 p.m.	7.45	6.15	168	7.31
04:00 p.m.	7.56	6.08	168	7.4
05:00 p.m.	7.51	6.01	166	7.3
06:00 p.m.	7.51	6	166	7.29
07:00 p.m.	7.53	6.01	165	7.25
08:00 p.m.	7.54	6	164	7.3
09:00 p.m.	7.55	6.2	165	7.31
10:00 p.m.	7.55	5.6	165	7.3
11:00 p.m.	7.55	5.5	165	7.3
11:00 p.m.	7.54	5.5	167	7.3
<b>MÁXIMO</b>	7.56	7.3	168	7.4
<b>MÍNIMO</b>	7.45	5.2	160	7
<b>PROMEDIO</b>	7.52	6.16	165.13	7.27

**Tabla 15.** Caracterización de parámetros de los afluentes (Mayo de 2006).

<b>NOMBRE</b>	<b>LOCALIZACIÓN (Km)</b>	<b>CAUDAL (m3/s)</b>	<b>CONDUT (umhos)</b>	<b>OD (mg/l)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>pH</b>
Quebrada Matogiro	1.05	0.78	293	5.22	5.2	7.1
Q. ARD Bonda	1.93	0.015	392	2.23	55.23	7.25
Quebrada Veracruz	4.75	0.01	365	5.18	25.18	7.42
Quebrada Mojada	4.45	0.06	421	4.95	15.95	7.7
Quebrada Mojada	4.95	0.05	256	5.6	5.92	7.4
Quebrada Tamacá	15.08	0.03	526	0.24	92.24	6.7

**Tabla 16.** Caracterización de la calidad del agua en cuatro (4) estaciones de monitoreo a lo largo del tramo simulado. (Mayo de 2006).

<b>LOCALIZACIÓN (Km)</b>	<b>CONDUCT (umhos)</b>	<b>OD (mg/l)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>pH</b>
2.78	266	7	5	7.1
4.55	375	7	4	6.8
13.9	420	6	13	7.2
17.5	600	5	14	7.1

Al simular el segundo conjunto de datos y establecer el Error Medio Cuadrático entre los resultados del cual 2k y el MOSIOD , con un error calculado para el OD de 0.007 mg/l. Y comprobando la capacidad predictiva del modelo al simular el otro periodo climático sin variaciones significativas de las tasas de reareación pues al evaluar las variaciones se presentan errores bajos. A lo cual permite hacer la inferencia explicita acerca de Validez del MOSIOD para la simulación del Río Manzanares en los diferentes regímenes climáticos de la Ciudad de Santa Marta.

#### **5.2.4 Simulación de Oxígeno Disuelto**

Al haber simulado en MOSIOD satisfactoriamente las condiciones presentadas en qual2k para el periodo de verano e invierno. En las Figuras 15 y 16 se muestran los resultados de dichas simulaciones de OD respectivamente. Las graficas muestran el comportamiento de la variable lo largo del tramo simulado, de igual manera, se evidencian la significancia del Modelo simulado con los datos de campo. En cuanto, a la variación espacial del OD a lo largo del río se aprecia que en la cabecera de la simulación que correspondería a la parte alta de la corriente hídrica tiene características que propician la dinámica de reareación evidenciándose concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 7.5 mg/l, valor que difiere de 1 mg/L con el oxígeno de Saturación. Por otra parte se evidencia en la Figura 15 que corresponde al periodo seco la afectación que tiene el OD a lo largo del tramo simulados de tal manera que se aprecia los valores significativamente afectados por la influencia de las altas cargas de aguas residuales, entre los kilómetros dos (2) y cuatro( 4), seguidamente se presenta un aumento de los valores de OD cercanos a 7 mg/L, dicho proceso que reporta la literatura como proceso de auto-purificación va desde el Km 4 hasta el puente de la línea férrea ubicado en el km 10 al sur-orientado del Barrio Mamatoco, dicho fenómeno de auto-purificación es fácilmente atribuible al lecho rocoso y la geometría del cauce que propicia en dicho sector velocidades que ayudan a estabilizar el sistema, de igual manera la ausencia de descargas puntuales en dicho segmento facilitan el proceso. Seguidamente, a la intensa actividad de reareación que se presenta en el km 10, viene un decaimiento progresivo del Oxígeno Disuelto por las múltiples descargas aguas residuales domésticas, obteniendo datos de OD en la desembocadura del río de 3.0 mg/l valor que acompañado al empobrecimiento del paisaje en dicho sector lo convierte en una zona de características limitadas respecto al uso del recurso y la fauna presente.

Por otro lado, la figura 16 representa la simulación correspondiente al periodo de lluvias, característica que muestra una tendencia estable del tramo simulado pero con picos que no logran ser alarmantes pues son fácilmente asimilables por el sistema hídrico, aunque la tendencia al igual que en el verano es de disminuir el OD en dirección aguas abajo encontrando valores de 4.5 mg/l en la desembocadura.

Figura 15. Simulación MOSIOD -Oxígeno Disuelto- Rio Manzanares, (Verano, Julio 2005)

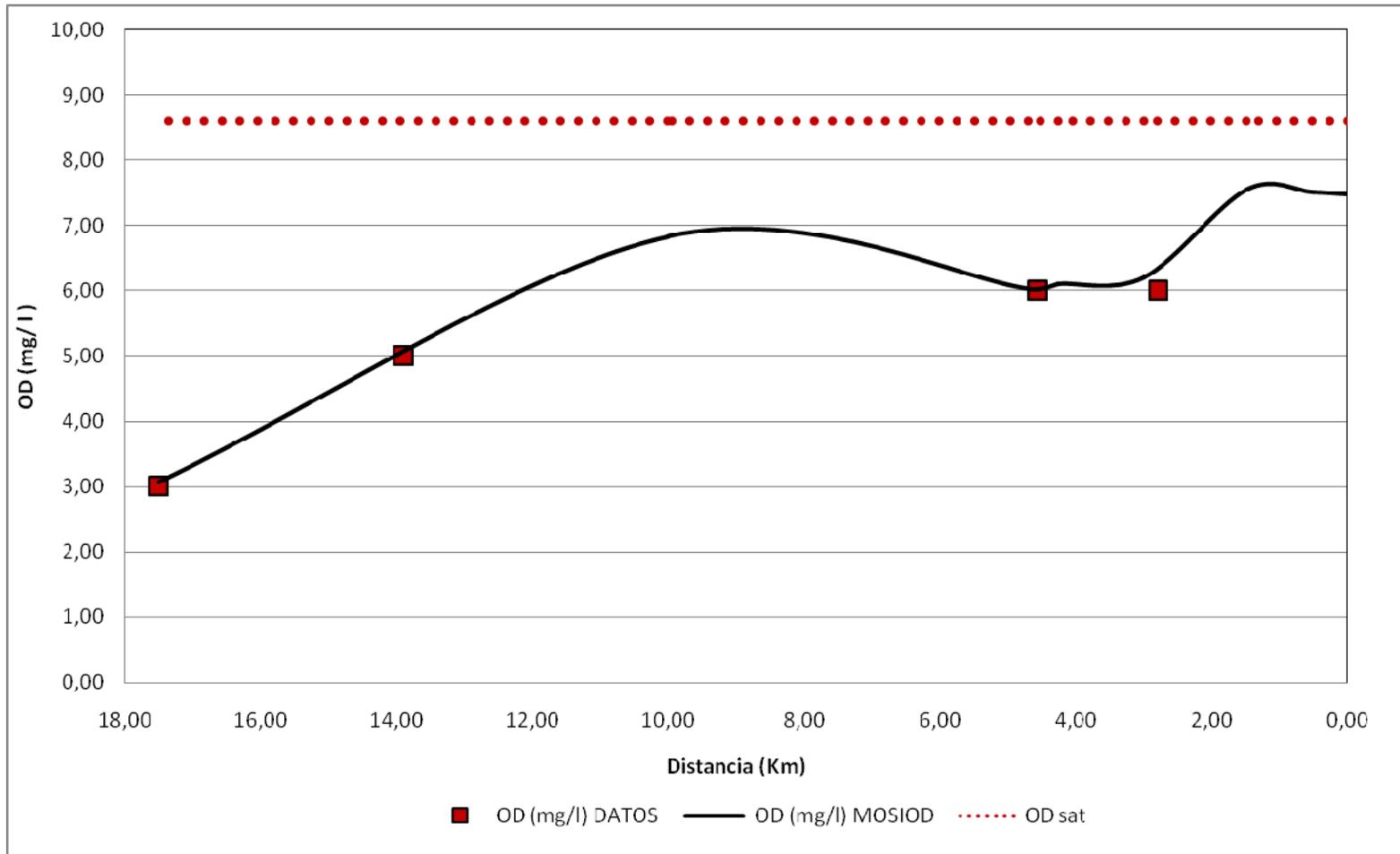
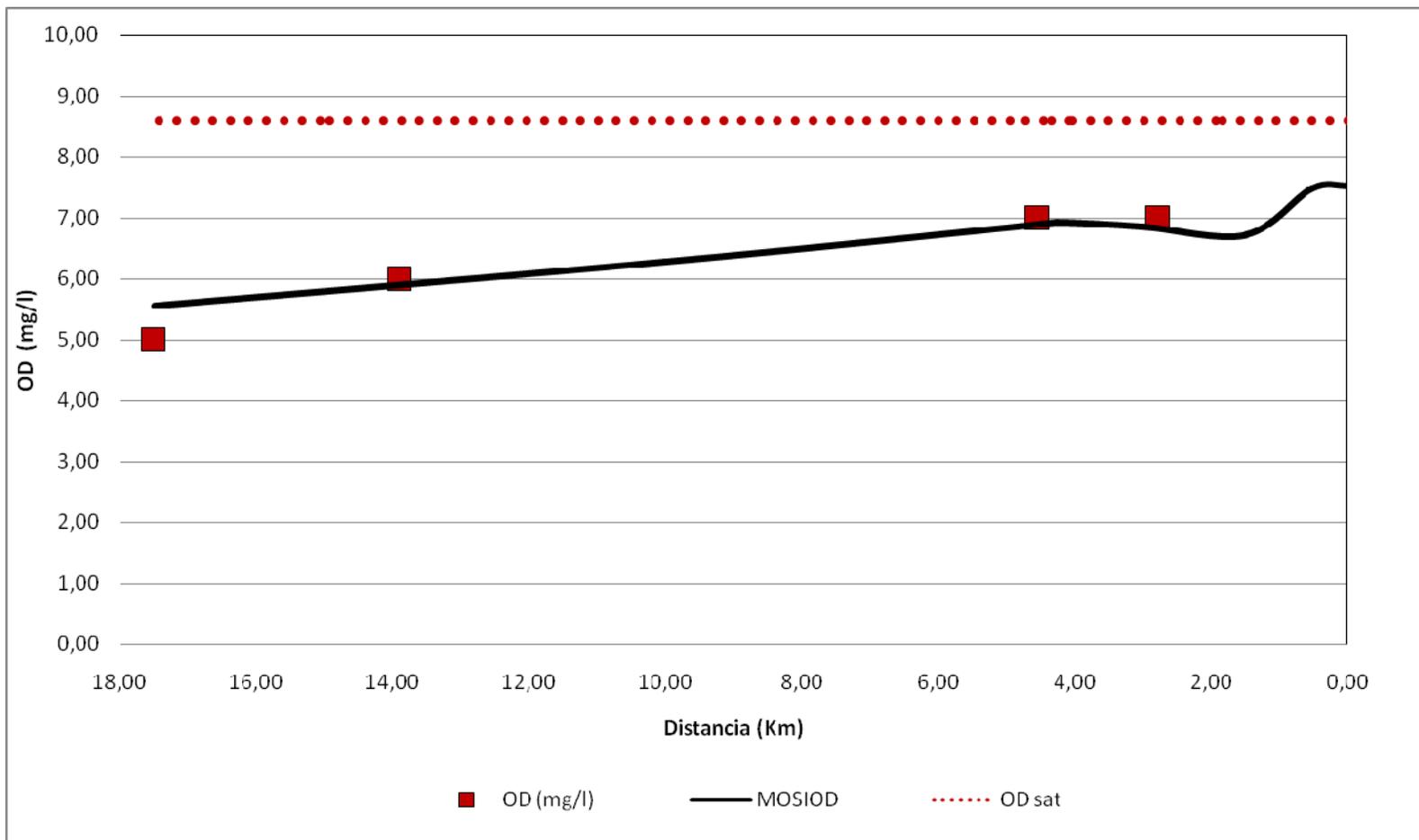


Figura 16. Simulación MOSIOD -Oxígeno Disuelto- Río Manzanares, (Invierno, Mayo 2006)



### 5.3 Simulaciones comparativas MOSIOD vs Qual 2K

La utilidad de los modelos matemáticos está determinada en gran medida por su habilidad en reproducir con precisión serie de datos observados, es por ello que los modeladores ponen enfático cuidado al nivel de calibración logrado, y a la capacidad productiva al describir otros escenarios, series de tiempo sin que se requiera ajuste exhaustivo de alguno de los parámetros calibrados.

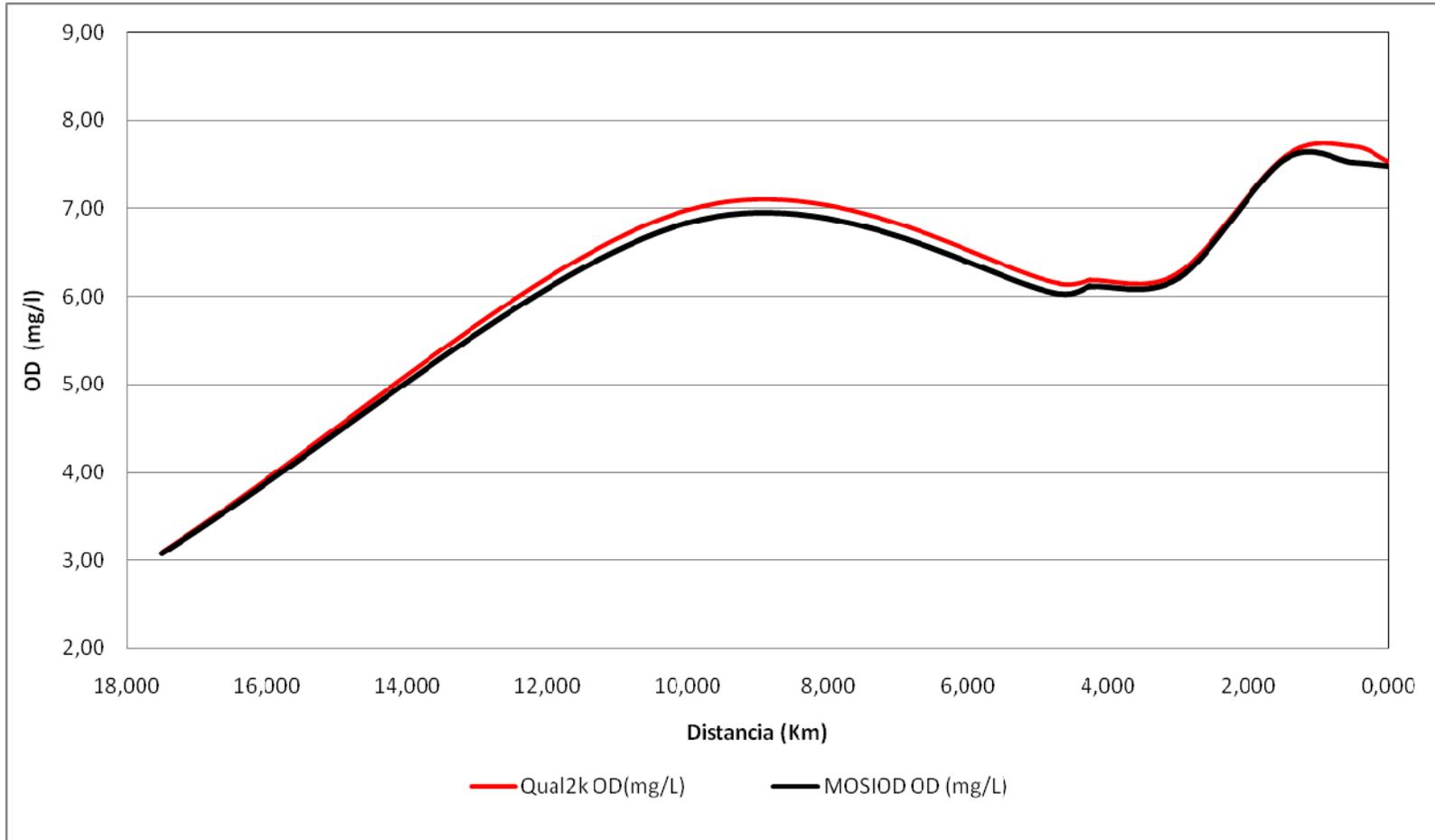
La tabla 17. Presenta un cuadro comparativo de los errores calculados entre los datos simulados por el qual 2k y el MOSIOD, nótese los promedios de error entre los periodos de verano e invierno se encuentran por debajo del 2%, valor que aplicando la formula de RMS (Kennedy y Neville, 1976), tenemos que  $\pm 0.007 \text{ mg/l}$  de erro medio cuadrático estimado para el periodo de verano y  $\pm 0.007 \text{ mg/l}$  para el periodo de invierno.

**Tabla 17.** Errores calculados para el periodo de verano e invierno.

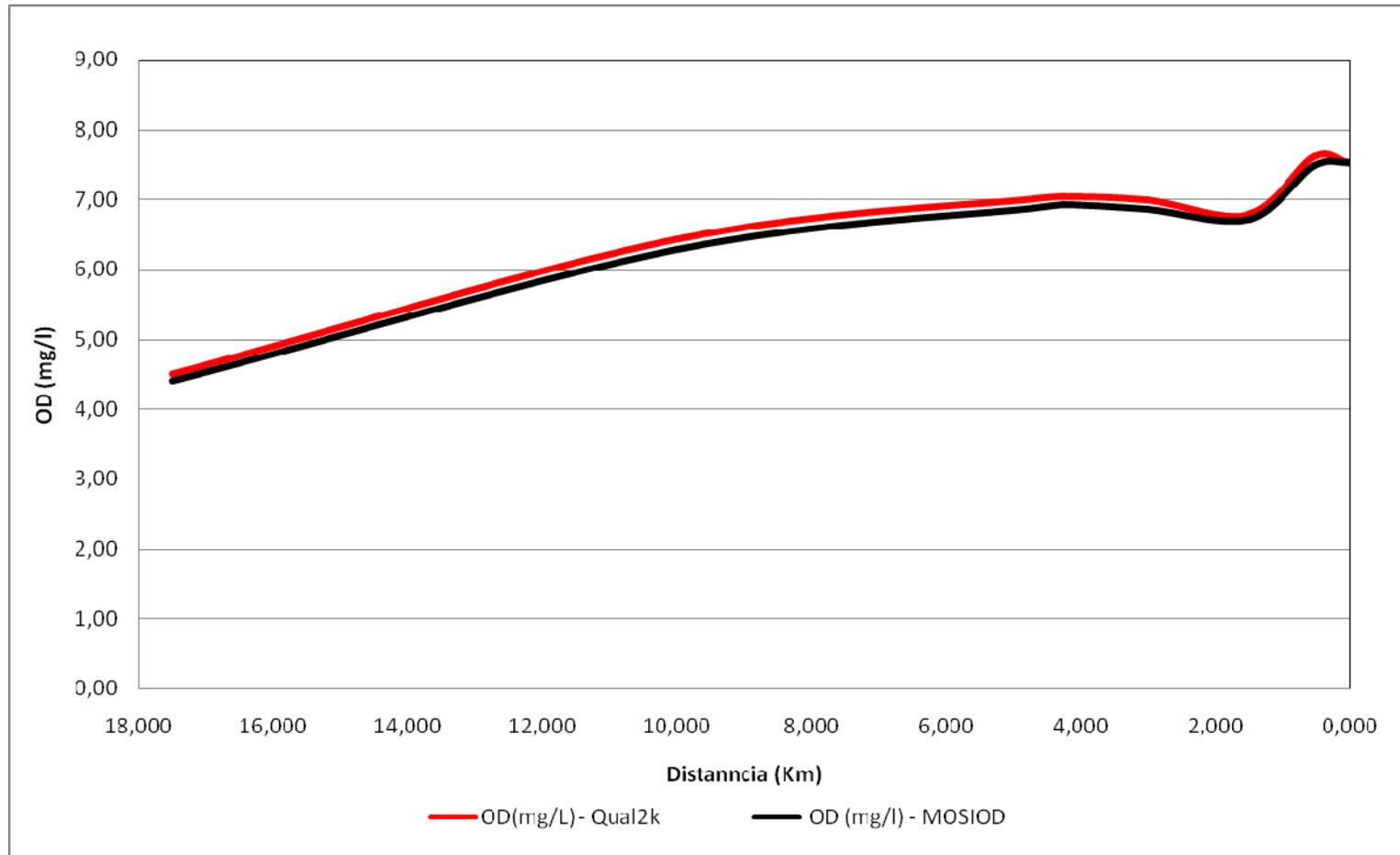
Localización	VERANO			INVIERNO		
	MOSIOD (mg/l)	QUAL 2K (mg/l)	ERROR %	MOSIOD (mg/l)	QUAL 2K (mg/l)	ERROR %
PRESA	7.53	7.53	0.00	7.53	7.53	0.00
Q. MATOGIRO	7.71	7.63	1.05	7.48	7.61	1.80
Q. AR BONDA	7.60	7.41	2.44	6.72	6.79	1.02
Q. VOLQUETAS	6.27	6.21	0.93	6.86	7.00	2.00
Q. MOJADA	6.19	6.07	1.87	6.92	7.04	1.74
Q. SECA	6.14	6.01	2.17	6.88	7.01	2.02
Q. TAMACA	6.98	6.79	2.74	6.28	6.43	2.42
DESEMBOCADURA	3.10	3.04	1.87	4.40	4.50	2.27
Promedio	6.44	6.34	1.63	6.63	6.74	1.66

Las figuras 17 y 18, presentan el perfil longitudinal del OD a través del Río simulado por MOSIOD y comparado con los resultados de la simulación del qual 2K.

Figura 17. Simulación MOSIOD Vs QUAL 2K, verano.



**Figura 18.** Simulación MOSIOD Vs QUAL 2K, Invierno



#### **5.4 Simulación de Escenarios**

En aras de establecer el cumplimiento a los alcances y objetivos propuestos en la presente investigación, los desarrolladores del MOSIOD, examinaremos a partir de la exitosa calibración y validación los escenarios que favorecen el saneamiento del río Manzanares, dichos escenarios serán comparado uno a uno con los simulados por el modelo Qual 2k aplicado por Guizao y Díaz, 2007.

MOSIOD simulo cinco (5) escenarios que se describen a continuación:

1. Evaluación de la capacidad de autodepuración del río Manzanares en el caso de no existir carga contaminante en la quebrada Matogiro.
2. Simulación del comportamiento de OD en el río Manzanares al no existir carga contaminante en la quebrada con aguas residuales domésticas a la altura del corregimiento de Bonda.
3. El efecto conjunto de las dos (2) quebradas de los anteriores escenarios.
4. Evaluación del efecto del vertimiento de ARD en la parte más baja del río.
5. Examinar la influencia sobre la calidad del agua del río Manzanares por la extracción de agua de este cuerpo hídrico para la recarga artificial del acuífero de la ciudad de Santa Marta.

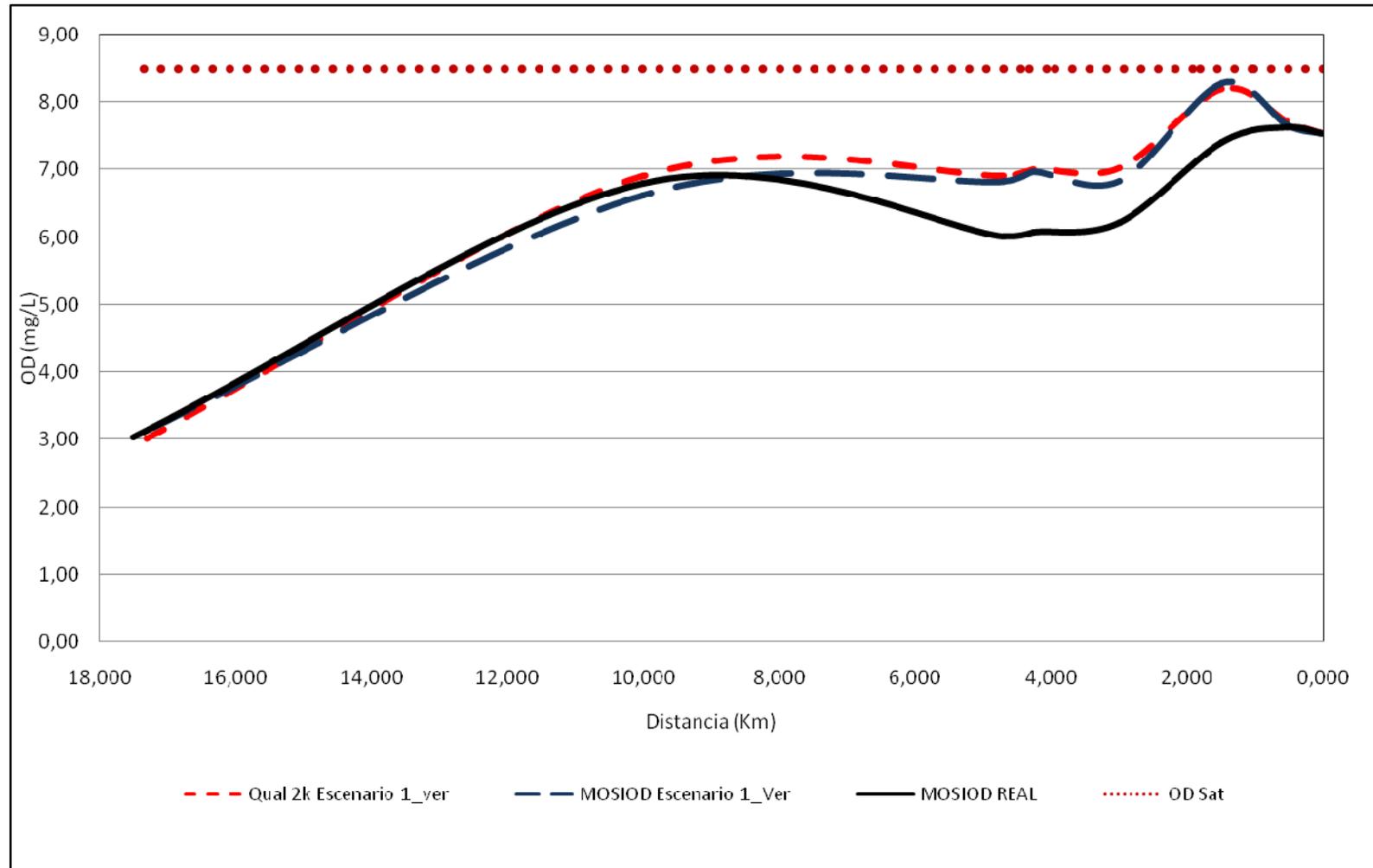
A continuación se presenta el perfil longitudinal del oxígeno disuelto de cada escenario (verano e invierno) comparado con las condiciones actuales y la simulación del qual 2k.

#### **5.4.1 Escenario 1. Concentración del Oxígeno Disuelto del Río Manzanares sin carga contaminante en la Quebrada Matogiro.**

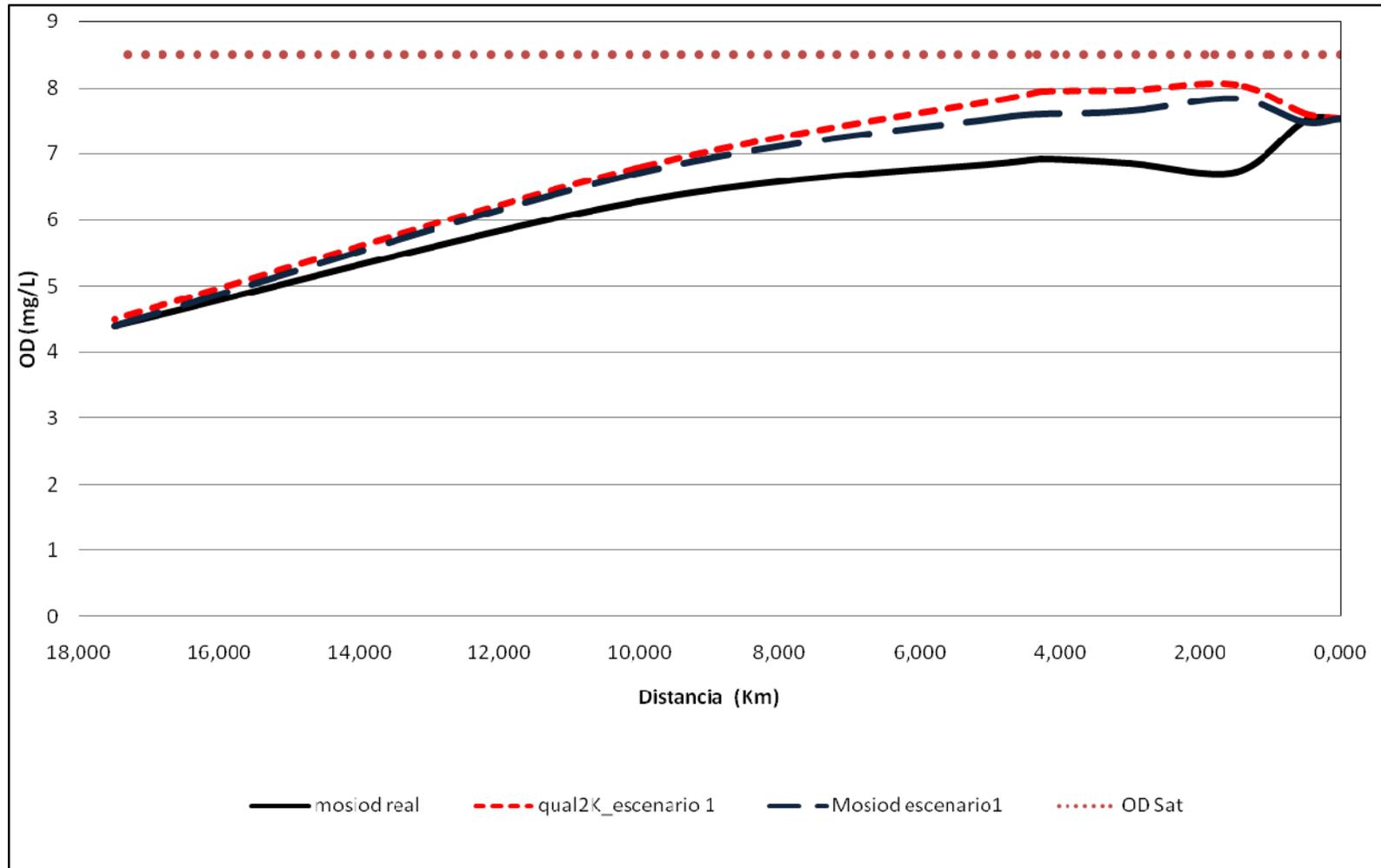
Este escenario simula el comportamiento del oxígeno disuelto ante la no existencia de la fuente de carga contaminante de la quebrada Matogiro, las graficas 19 y 20, presentan cuatro (4) líneas que describen una característica en particular. En el caso de la línea negra representa la OD real (simulación actual, para el periodo de invierno y verano), la línea azul fragmentada representa el escenario simulado por MOSIOD, la línea roja representa la OD del escenario por el Qual 2k y la línea punteada de color rojo representa el oxígeno de saturación.

Las graficas muestran para ambos periodo el decaimiento de la concentración de OD a partir de kilometro 1.05 distancia aguas debajo de la cabecera. Se reporto que la variación existente de cerca de 3 mg/L entre la condición real y el escenario simulado. Los errores medio cuadrático del sistema entre lo simulado por MOSIOD y el Qual 2k fue de 0.009 mg/L para verano y 0.009 mg/L para invierno.

**Figura 19.** Escenario 1. Oxígeno Disuelto del Río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante de la quebrada Matogiro. (Periodo de verano)



**Figura 20.** Oxígeno Disuelto del Río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante de la quebrada Matogiro. (Periodo de Invierno).

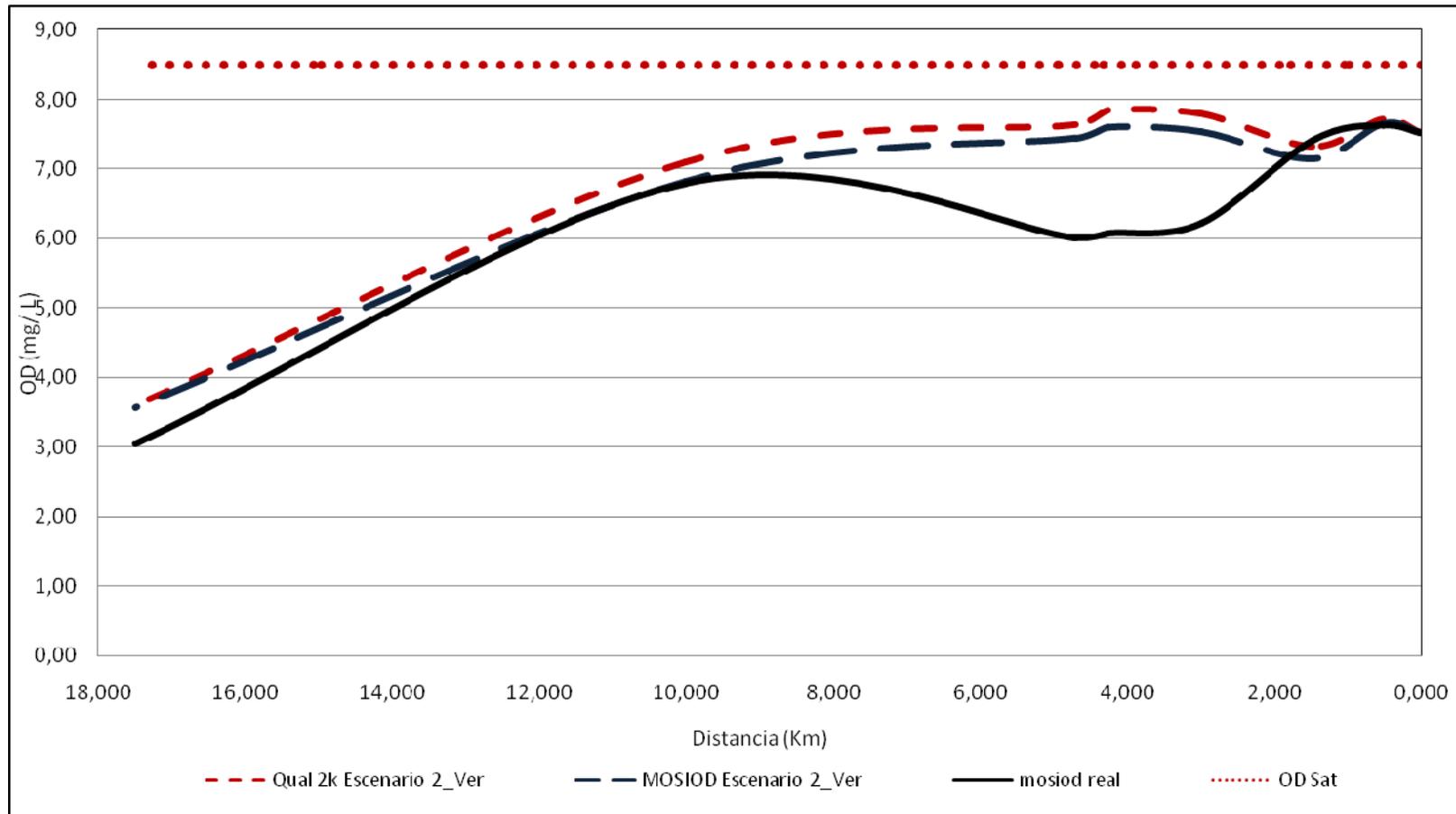


#### **5.4.2 Escenario 2. Simulación del comportamiento de OD en el Río Manzanares al no existir carga contaminante en la quebrada con aguas residuales domésticas a la altura del corregimiento de Bonda.**

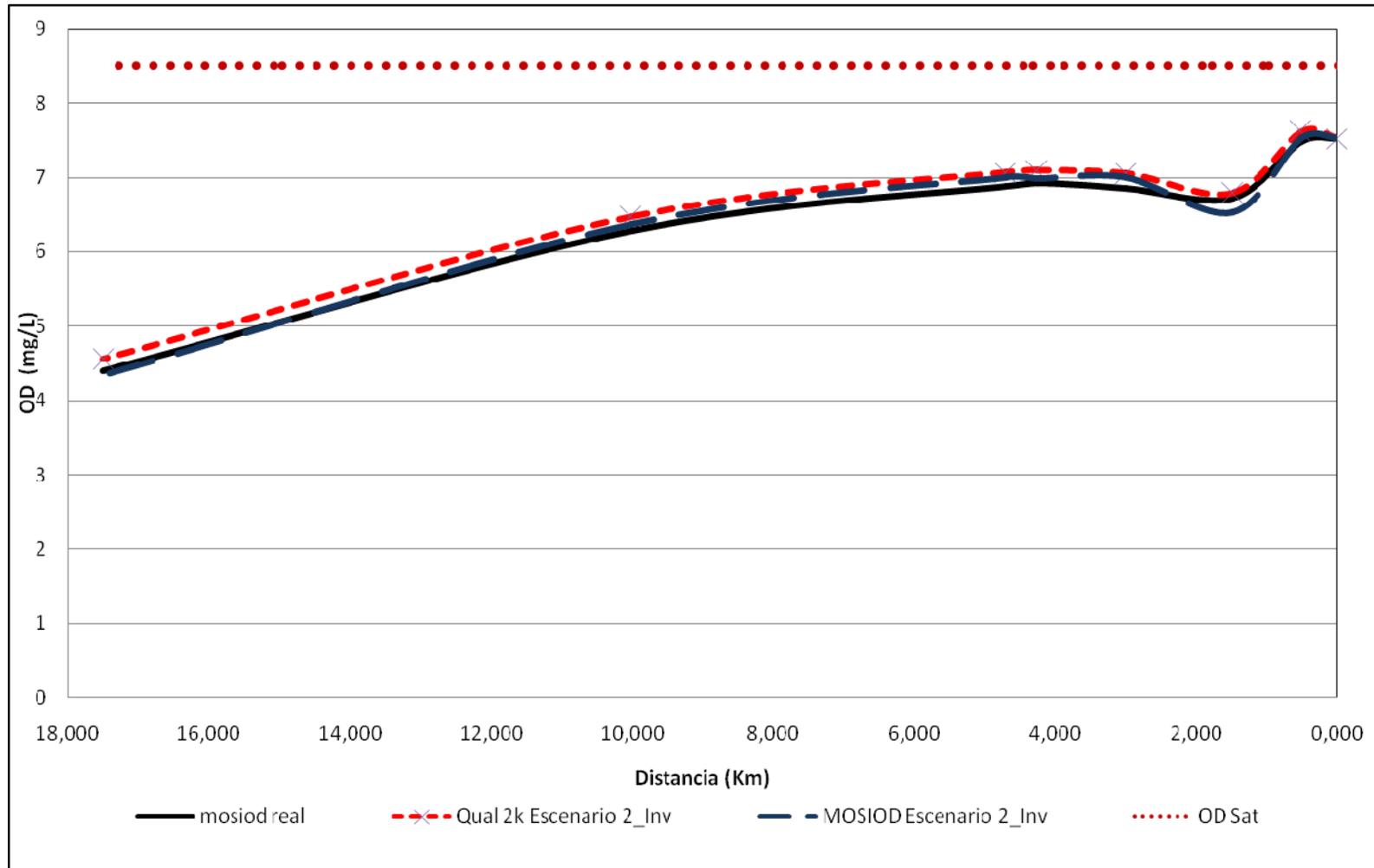
Las figuras 21 y 22 presentan la simulación del Oxígeno Disuelto del río Manzanares considerando la presunción de la eliminación de la carga contaminante de la quebrada con aguas residuales domésticas que ingresa al río manzanares en el km 1.93 que corresponde al zona urbana de Bonda del tramo simulado. Dichas graficas, presentan los resultados del comportamiento de la variable de estudio en los dos periodos. La línea negra representa la variación espacial de la OD simulado por MOSIOD bajo las condiciones reales del tramo para la fecha de calibración, mientras la segmentada de color azul representa el comportamiento de la variable en estudio considerando el no ingreso de la carga contaminante aportada por el afluente. De igual manera mostramos el comportamiento del escenario simulado por el qual2k.

La simulación de verano, presenta la condición más crítica puesto que se aprecia claramente los niveles del escenario simulado por encima de la condición actual, presentando hasta 1.5 mg/L entre el escenario y la condición actual. Por otra parte, la simulación del escenario durante invierno tuvo un comportamiento muy similar en la distribución espacial del rio. Los errores medio cuadrático entre lo simulado por el MOSIOD y el qual2k fueron de 0.009 mg/L para invierno y 0.012 mg/L para verano.

**Figura 21.** Escenario 2. OD del río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante aportada por la quebrada con ARD a la altura del corregimiento de Bonda. (Periodo de verano).



**Figura 22.** Escenario 2. OD del río Manzanares sin la influencia de la carga contaminante aportada por la quebrada con ARD a la altura del corregimiento de Bonda. (Periodo de Invierno).

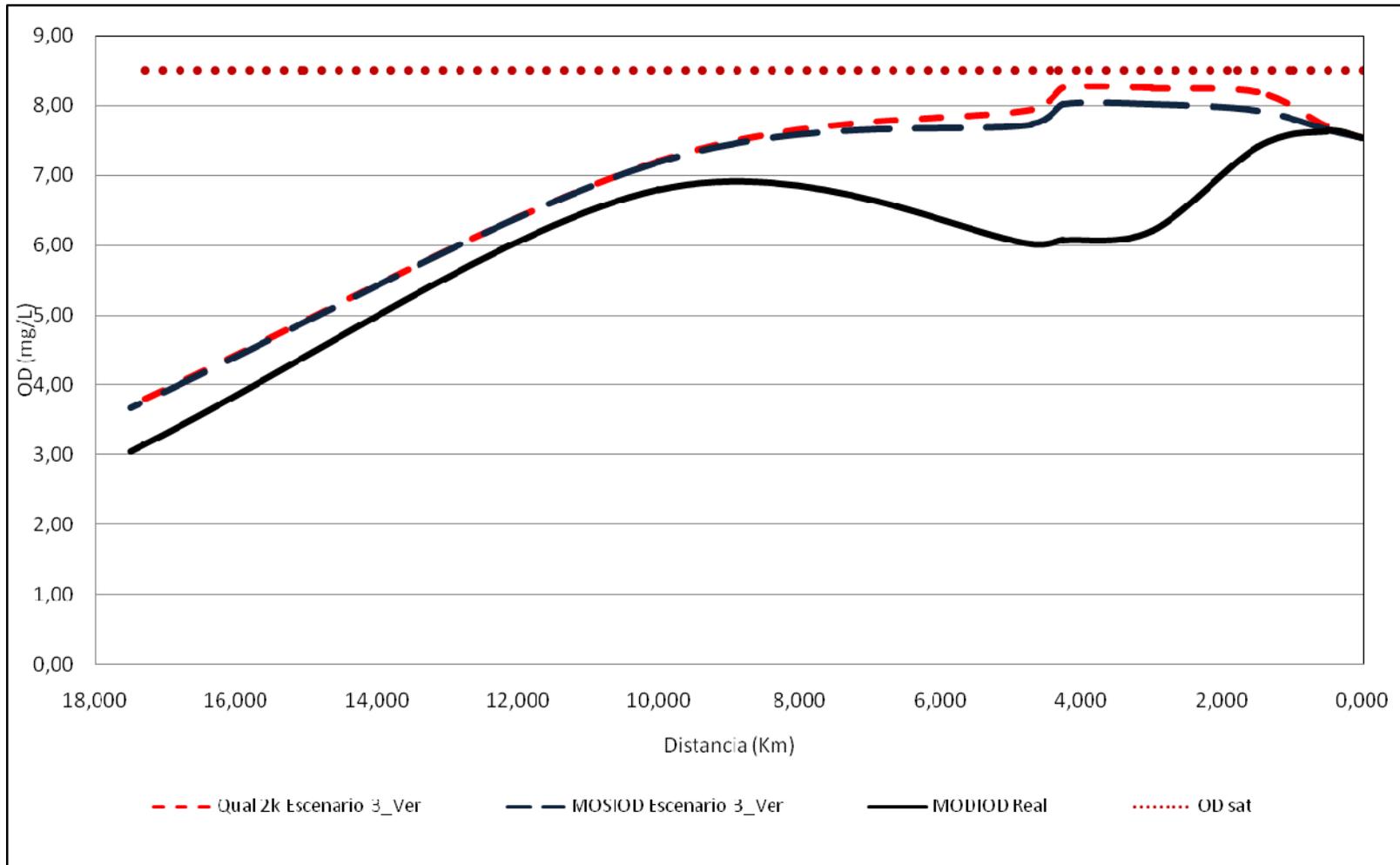


### **5.4.3 Escenario 3. OD del Río Manzanares sin la carga contaminante de las quebradas Matogiro y la quebrada con ARD a la altura de Bonda.**

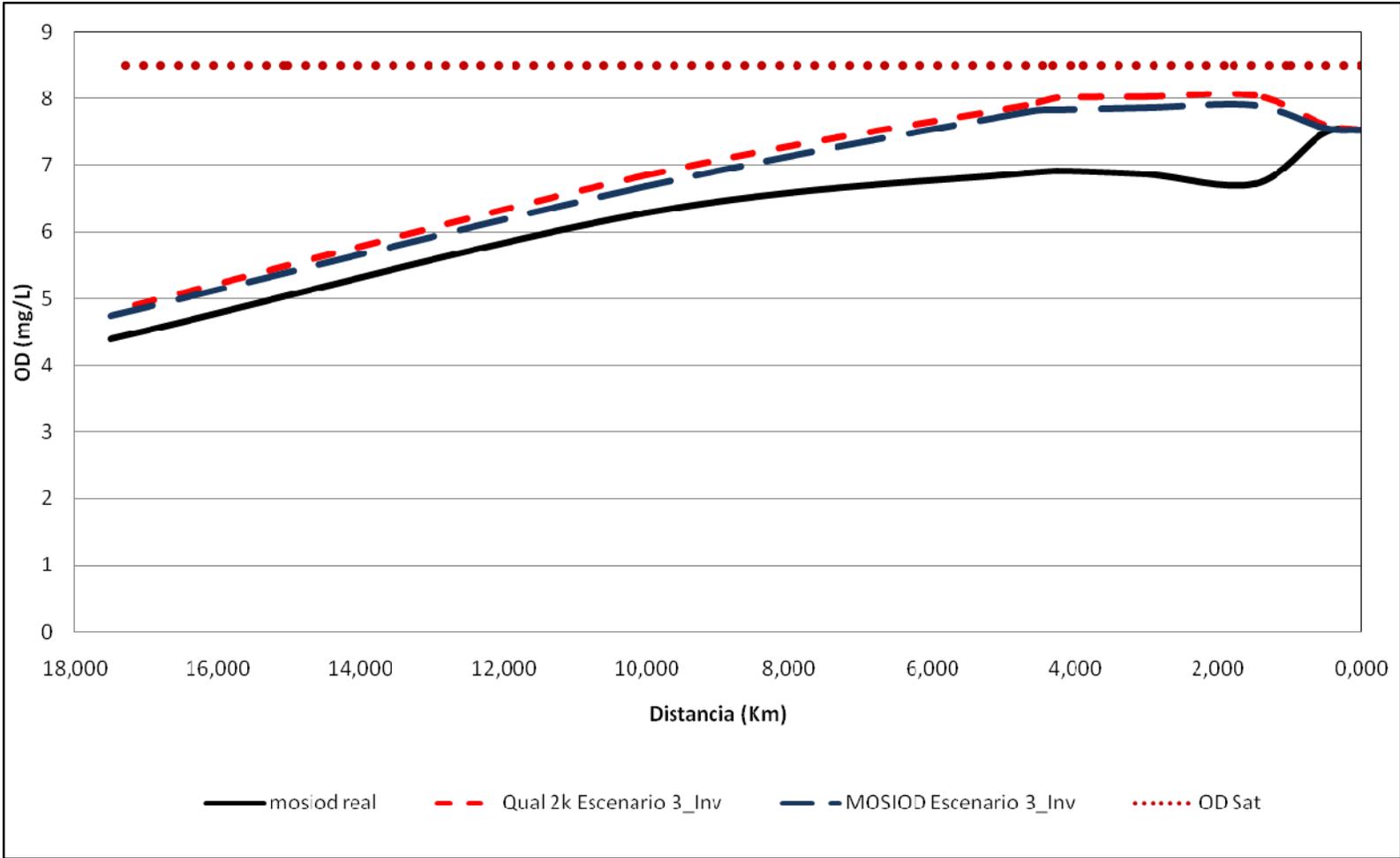
Las figuras 23 y 24 muestran el comportamiento del Oxígeno Disuelto como indicador de la calidad de agua para el periodo de la época seca y de lluvias moderadas, dichas simulaciones están fundamentadas en considerar los escenarios uno (1) y dos (2) que asumen el no ingreso de fuentes puntuales.

El periodo de verano se caracteriza por el déficit de OD entre el kilómetro (1.05) y (6.00). Pues se observa el decaimiento de hasta 2 mg/L de OD en el segmento, aspecto que refleja la afectación real de las cargas contaminantes de las dos fuentes puntuales que ingresan al sistema. La grafica 23, también muestra que ante el no vertimiento al sistema de dichas fuentes los valores de OD se encontraran cerca a la línea de puntos circulares de color rojo que representa la saturación del OD. Por otra parte, la simulación que comprende el régimen climático de lluvias, se destaca de igual forma un OD cercano al nivel de saturación en caso de no presentarse el ingreso de las cargas. Los errores medio cuadráticos entre el escenario simulado por el MOSIOD representado por las líneas azules segmentadas y el qual2k de color rojo fueron de 0.008 mg/L para invierno y 0.011 mg/L para verano.

**Figura 23.** Escenario 3. OD del Río Manzanares sin la carga contaminante de las quebradas Matogiro y la quebrada con ARD a la altura de Bonda. (Periodo de verano).



**Figura 24.** Escenario 3. OD del Río Manzanares sin la carga contaminante de las quebradas Matogiro y la quebrada con ARD a la altura de Bonda. (Periodo de invierno).



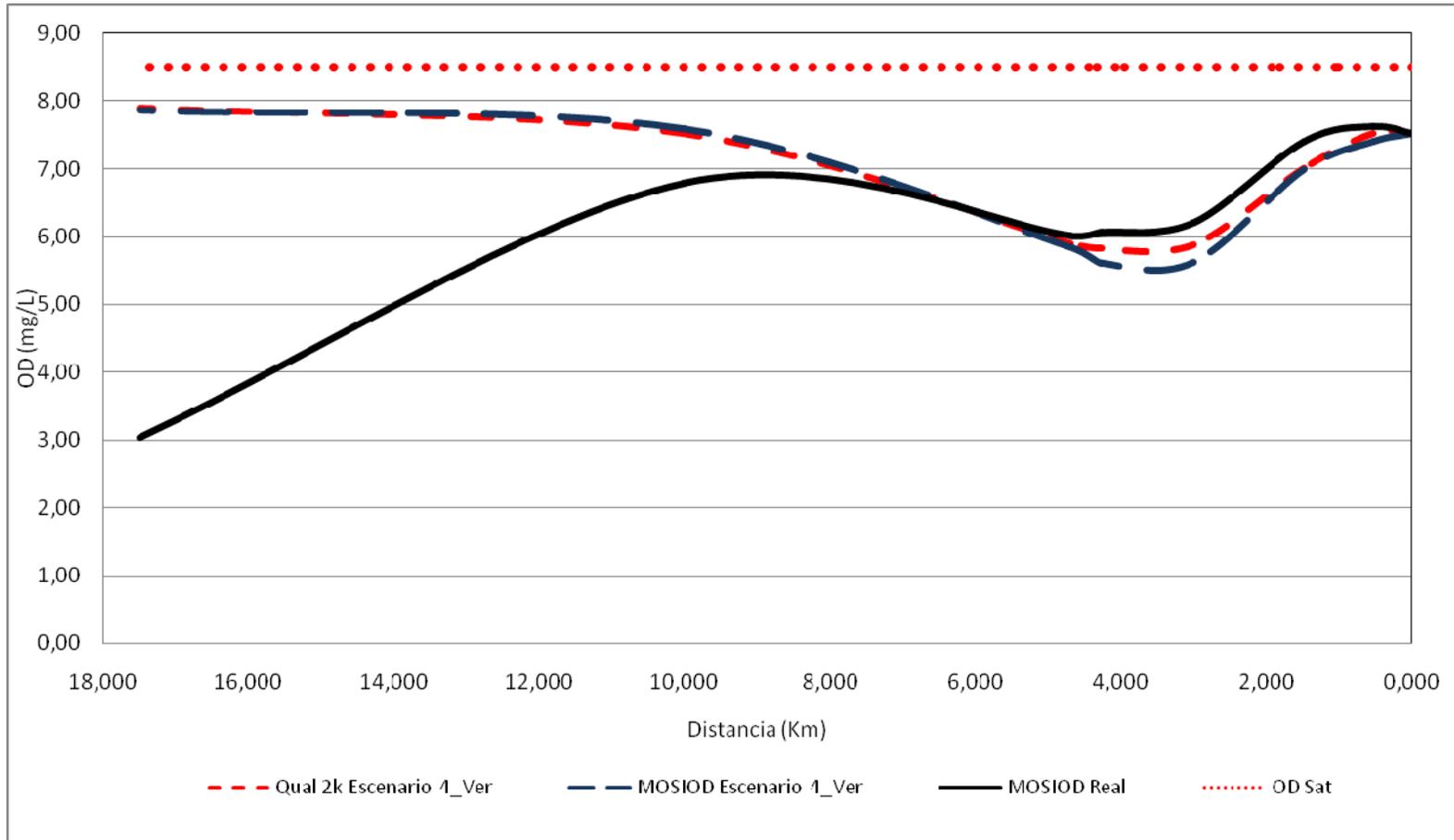
#### **5.4.4 Escenario 4. OD del Río Manzanares sin vertimiento de ARD a partir del barrio Mamatoco hacia abajo.**

La influencia de las descargas de aguas residuales domesticas simuladas en MOSIOD como fuentes difusas son las consideraciones que se reproducen en este escenario. MOSIOD considera la distribución porcentual en el tramo de estudio, dicha característica permite que la segmentación de cada tramo sea independiente de la longitud de las fuentes difusas, de esta manera, la representación del ingreso de las cargas contaminantes de múltiples vertimientos de las casas y zonas aledañas como fuentes difusas, no crean limitación alguna para la simulación del escenario.

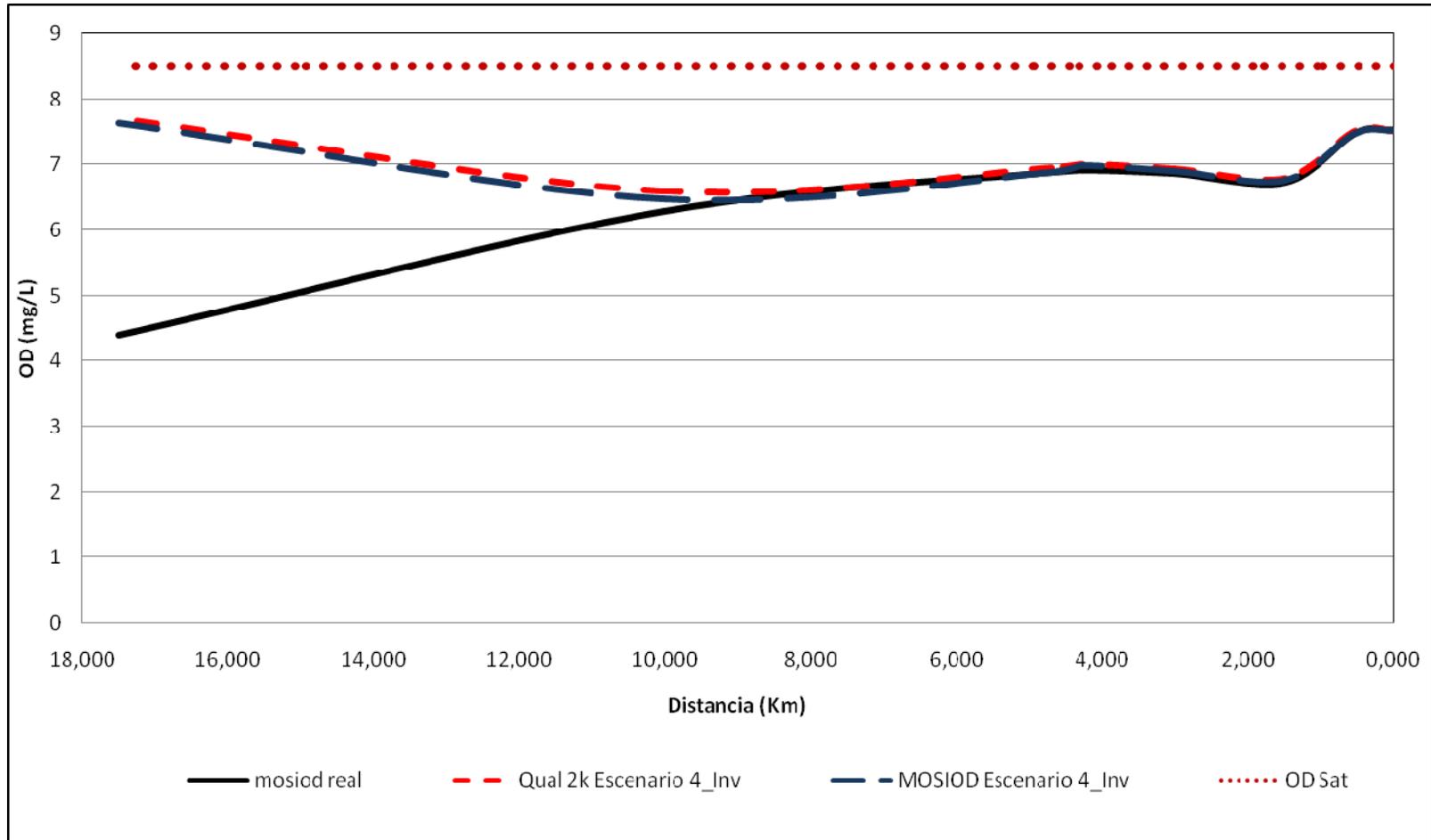
La figura 25, validada representa el periodo de verano que es el más crítico en sus condiciones pues la influencia de tales descargas logran tener una diferencia de hasta 5mg/L en los últimos kilómetros, de igual manera se aprecia como el escenario real identificado por el trazo de color negro empieza a decaer rápidamente desde el kilometro 10 hasta llegar a la desembocadura donde el modelo muestra valores cercanos a 3mg/L. En la misma grafica, con líneas segmentadas de color azul se muestra el potencial de auto-depuración que tuviese el río sin dichos vertimientos, obteniendo como resultado después de la calibración valores de 0.008 mg/L de error medio cuadrático.

La Figura 26, representa el escenario bajo las condiciones de invierno en ella se destaca los mismos aspectos del periodo de verano en cuanto a la eminente influencia de las fuentes difusas pero con decaimiento hasta valores cercanos a 4 mg/L en la desembocadura. Es importante, resaltar la capacidad del MOSIOD de reproducir confiablemente las simulaciones con bajo margen de diferencia respecto a la simulación del qual2k, con la cual se obtuvo un error medio cuadrático de 0.004 mg/L.

**Figura 25.** Escenario 4. OD del Río Manzanares sin vertimiento de ARD a partir del barrio Mamatoco hacia abajo. (Periodo de Verano).



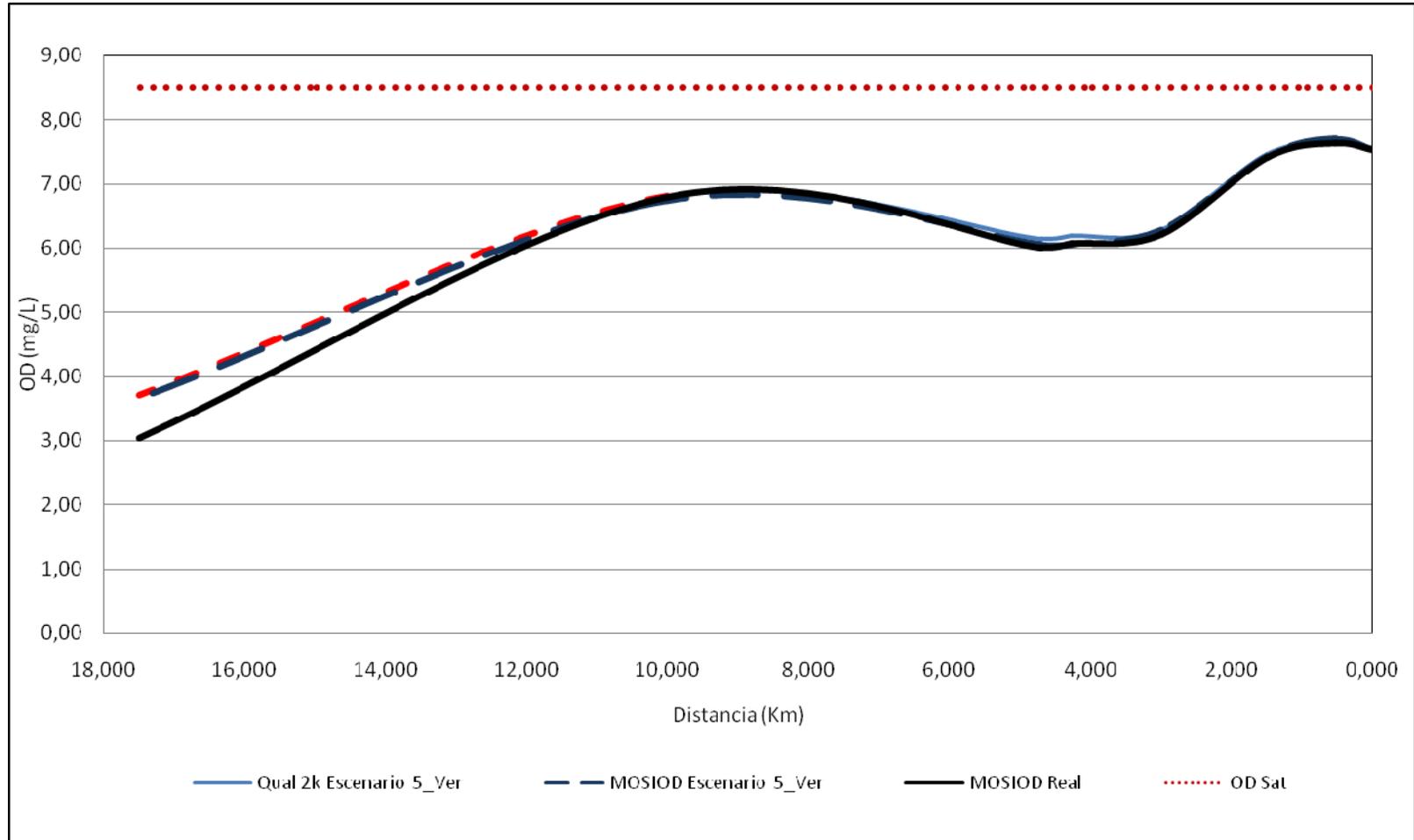
**Figura 26.** Escenario 4. OD del Río Manzanares sin vertimiento de ARD a partir del barrio Mamatoco hacia abajo. (Periodo de Invierno).



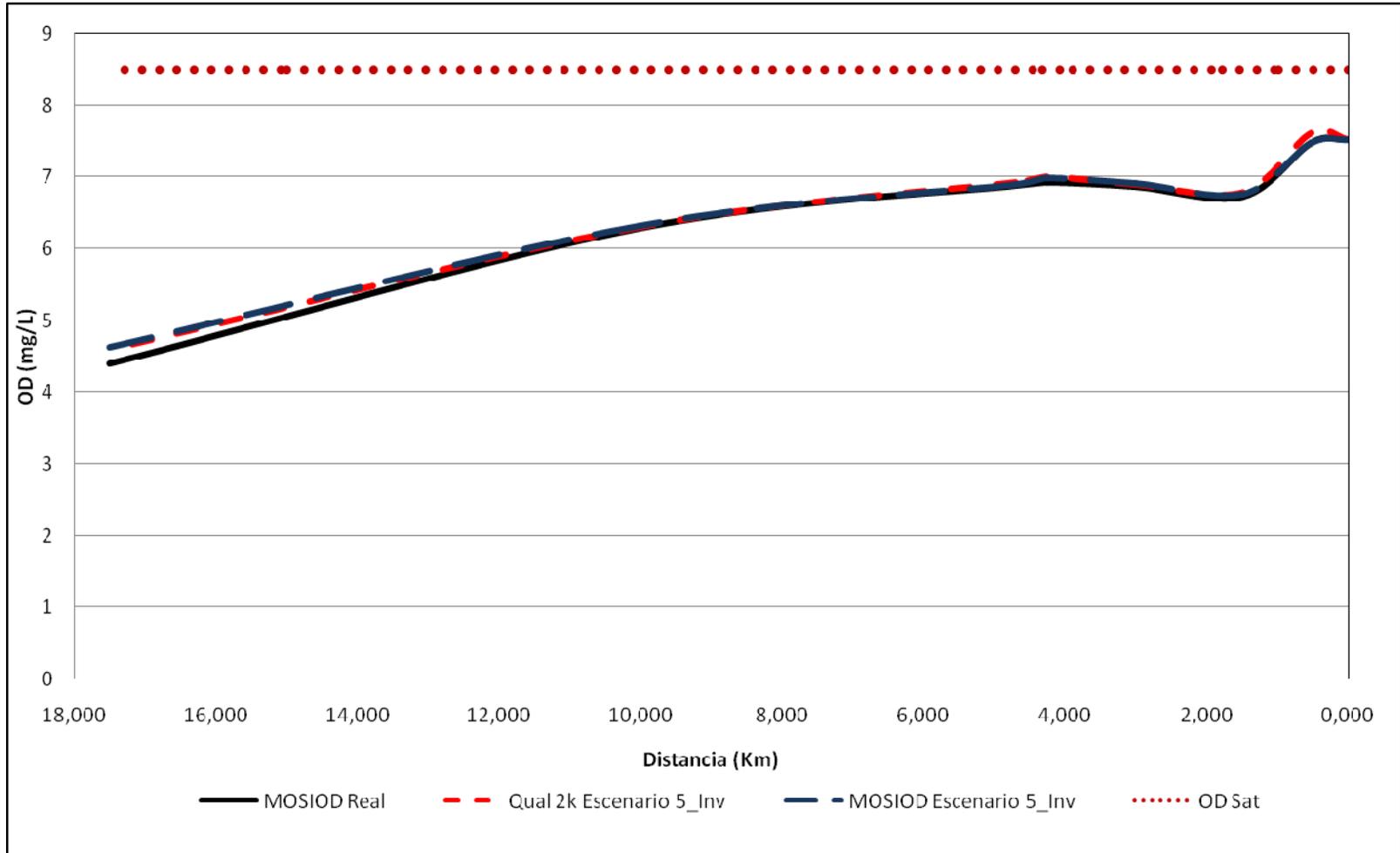
#### **5.4.5 Escenario 5. Ausencia de extracciones de agua para recarga artificial del acuífero de Santa Marta.**

Este escenario está fundamentado en permitirle al MOSIOD simular condiciones de extracciones de agua de la fuente hídrica con el ánimo de que el modelo pueda de igual manera desempeñarse de forma eficiente ajustado a la realidad. El objetivo de este escenario es analizar la influencia de las extracciones realizadas por dichas estructuras en la variación de OD a lo largo del Río. La figura 27 presenta el comportamiento de Verano en él se destaca que variaciones cercanas de 0.5 mg/L entre el escenario real y el reproducido por MOSIOD, el error medio cuadrático calculado entre los simulado por MOSIOD y el qual 2k es de 0.004 mg/L, Por otra parte la Figura 28, muestra con color negro el escenario real simulado por MOSIOD, de color azul segmentado el escenario propuesto y los trazos segmentados de color rojo, en este escenario el error medio cuadrático fue de 0.003 mg/L siendo el menor de todos los escenarios, en la grafica se aprecia la misma condición que verano pero con la característica de una diferencia de 0.2 mg/L entre el escenario real y propuesto.

**Figura 27.** Escenario 5. Evaluación de la influencia de las extracciones de agua para la recarga artificial del acuífero de Santa Marta sobre la calidad del agua del río Manzanares. (Periodo de verano).



**Figura 28.** Escenario 5. Evaluación de la influencia de las extracciones de agua para la recarga artificial del acuífero de Santa Marta sobre la calidad del agua del río Manzanares. (Periodo de invierno).



## 6 CONCLUSIONES

Se simuló la calidad del agua del Río Manzanares mediante el desarrollo de una herramienta numérica computacional propia, la cual incorpora las principales variables que afectan la concentración de oxígeno disuelto en este cuerpo de agua superficial. Con el desarrollo de una herramienta computacional propia (MOSIOD) aplicada a la modelación y simulación de la calidad del agua del río Manzanares se logró conocer el balance de oxígeno en función de la distancia recorrida por esta corriente. Se examinaron los efectos de las descargas de residuos líquidos que este recibe y diversos escenarios hipotéticos para su saneamiento. Los resultados en la implementación del modelo numérico y computacional desarrollado, mostraron validez y confiabilidad en su uso, pues al comparar sus resultados con otros modelos aplicados al mismo caso de estudio (Qual2K) y con mediciones de campo, se encontró una reproducción aceptablemente buena de la realidad. El MOSIOD refleja un comportamiento muy similar a las mediciones de campo y en su aplicación al caso de estudio del río Manzanares se encontraron errores inferiores al 5%.

Se desarrolló un modelo conceptual, que incorpora las principales variables que afectan la calidad del agua referida a la concentración de oxígeno disuelto, este permitió y facilitó el desarrollo de los modelos numéricos y computacionales del MOSIOD.

Con el uso del MOSIOD se pudieron examinar los efectos de diversos escenarios de saneamiento en el río Manzanares, tales como: **i)** Evaluación de la capacidad de autodepuración del río Manzanares en el caso de no existir carga contaminante en la quebrada Matogiro, **ii)** simulación del comportamiento de OD en el río Manzanares al no existir carga contaminante en la quebrada con aguas residuales

domésticas a la altura del corregimiento de Bonda, **iii)** El efecto conjunto de las dos (2) quebradas de los anteriores escenarios, **iv)** Evaluación del efecto del vertimiento de ARD en la parte más baja del río **v)** Examinar la influencia sobre la calidad del agua del río Manzanares por la extracción de agua de este cuerpo hídrico para la recarga artificial del acuífero de la ciudad de Santa Marta.

El MOSIOD se ajusta a la dinámica del Río Manzanares, permitiendo generar simulaciones basadas en las características hidráulicas, geométricas, topográficas y climáticas de este. Este cuerpo de agua superficial en su parte baja tiene concentraciones de oxígeno disuelto cercanas a 3 mg/l lo cual es corroborado en las simulaciones efectuadas con el MOSIOD. Ello denota un alto grado de contaminación dado las diferentes descargas de aguas residuales que recibe la corriente. Mediante el uso del MOSIOD, se pudo comprobar la afectación de la recarga artificial del acuífero y los efectos de puesto que la disminución de los niveles de agua influye desfavorablemente en la dinámica de dilución de los contaminantes. La aplicación del MOSIOD mostró confiabilidad en el análisis de los escenarios actuales y futuros para el saneamiento del río Manzanares.

Por otra parte, MOSIOD consta de un conjunto de expresiones matemáticas que definen los procesos físico y químicos que supuestamente ocurren en el río Manzanares. En la herramienta, el parámetro que condiciona el proceso de la calibración Vs las concentraciones de oxígeno disuelto es el coeficiente de reareación, el cual constituyó un parámetro de ajuste para la calibración. Aunque se dispuso de muy pocos datos para la calibración, igual se considera que el fundamento teórico de la herramienta, que es modelo de Streeter-Phelps es útil para simular el comportamiento del río constituyéndose en una adecuada herramienta para la evaluación de la calidad del agua. Siendo además una primera senda en la elaboración de herramientas propias para el control de los niveles de contaminación de nuestros recursos hídricos. Por lo tanto el Modelo puede emplearse con el fin de evaluar planes alternativos de ingeniería ambiental,

tal como se demostró que las técnicas de modelación y simulación constituyen una adecuada herramienta predictiva para la evaluación del impacto ambiental en proyectos que involucren cuerpos de agua.

## 7 RECOMENDACIONES

Para el mejoramiento del MOSIOD se debe tener en cuenta el impacto de los sedimentos y las tasas de consumo de las algas que generan un consumo de oxígeno en su degradación por parte de la actividad bacteriana.

Es de vital importancia el estudio experimental de las constantes cinéticas, dado que poseen un efecto relativo importante en cada una de las variables de salida, y por ende en la confiabilidad del modelo.

Se sugiere calibrar y validar el MOSIOD a otras corrientes superficiales, con el ánimo de evaluar la universalidad de la herramienta.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- Apha. 1999. Standard Methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association. U.S. Environmental Protection Agency;19.
- Camacho, L.A., Chapra, S., Lees, M.J., 2000. On the relationship of transient storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams. *Water resources research*;36(1):213-224.
- Camacho, L.A., Diaz-Granados, M.A., Giraldo, E., 2001. Contribución al desarrollo de un modelo de calidad del agua apropiado para evaluar alternativas de saneamiento del río Bogotá. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia, A.A. 4976, Bogotá Colombia.
- Camacho, L.A., 1997. Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate deadzone mixing concepts, Msc. dissertation, University of London, Imperial College of Science Technology and Medicine.
- Castillo, G., 1979. HIDROX. Un Modelo Generalizado de Simulación de Calidad de Aguas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile;l-46
- Céspedes, D., Camacho, L.A., 2000. Calibración, aplicación y comparación de modelos de flujo no permanente en la cuenca media del río Bogotá. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia.
- Chang, H., 2005. Spatial and temporal variations of water quality in the Han River and its tributaries, Seoul, Korea. *Water Air Soil Pollut*;161:267–284.
- Chapra, S.C., and Pelletier, G.J., 2003. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford,
- Chapra, S.C. (1996) *Surface Water Quality Modeling* McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1994. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill.
- Cox, B.A., 2003. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Sci. Total Environ*;314–316,335–377.
- De Arco, Edaimen., De Leon, David., 2006. Caracterización Hidrológica de la cuenca del Río Manzanares y Evaluación de su Disponibilidad Hídrica, Universidad del Magdalena. Proyecto de investigación., Santa Marta, Colombia.
- Ellis, M.M., 1937. Detection and measurement of stream pollution. *Bull. U.S. Bureau Sport Fish. Wildlife*;48(22):365–437.
- Guisao J.C., Bolaños J.J. 2007. Simulación de la calidad del agua del río Manzanares utilizando el modelo Qual 2K, Universidad del Magdalena. Proyecto de investigación., Santa Marta, Colombia.
- Kannel, P.R., Lee, S., Kanel, S.R., Lee, Y., Ahn, K.-H., 2007. Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Environ. Monit. Assess*;125:201–217.
- Kachiashvili, K., Gordeziani, D., Lazarov, R., Melikdzhanian, D., 2006. Modeling and simulation of pollutants transport in rivers, *Applied Mathematical Modelling*;31:1371–1396
- Loucks, D. P. et al. 1982. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice- Hall, Inc. New Jersey, USA.
- McAvoy, D.C., Masscheleyn, P., Peng, C., Morrall, S.W., Casilla, A.B., Lim, J.M.U., 2003. Risk assessment approach for wastewater using the QUAL2E water quality model. *Chemosphere*;52:55-66.
- Metcalf., Hedi., 1995. Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 3ª Edición. Mc. Graw Hill., 1485 pp.
- MacDonald, I., Baines, MJ., Nichols, NK., Samuels, PG., 1995. Steady open channel test problems with analytical solutions. Technical Report NA3y95. Department of Mathematics, University of Reading.
- Mwanuzi, F.L., 2000. Assessment of water quality for Pangani river in Tanzania using QUAL2E windows version. 1 st WARFSA/WaterNet Symposium: Sustainable Use of Water Resources.

- Novotny, V., 2002. Water Quality: Diffusion Pollution and Watershed Management. Wiley, Hoboken, NJ.
- Oyarzún, Jessica., 2004. Modelación y simulación de oxígeno disuelto, materia orgánica y relación distribucional de macroinvertebrados en la subcuenca del río traiguén, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de Temuco. Proyecto de investigación., Temuco, Chile.
- Park, S.S., Lee, Y.S., 2002. A water quality modeling study of Nakdong River, Korea. Ecological Modelling;152:65-75.
- Parra, O., Habit, E., Badilla, M., 2004. Desarrollo de un modelo de calidad del agua en ríos para la evaluación de los efectos de los efluentes y de las modificaciones en el caudal. Proyecto FONDEF D001-1135.
- Poch, M., 1999. Las calidades del agua. Cuadernos de Medio Ambiente. Edición Ribes. Barcelona.
- Reckhow, K.H., 1994. The importance of scientific uncertainty in decision making. Environmental Management;18:161-166.
- Ricaurte, S., 2001. Desarrollo Y Aplicación De Un Modelo Agregado De Calidad De Agua En El Tramo Girardot- Puerto Berrio Del Río Magdalena. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Proyecto de Investigación., Bogota, Colombia
- Rodríguez, Tatiana. 2002. Modelación de la calidad del agua en la cuenca alta del río bogota. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Proyecto de Investigación., Bogota, Colombia,
- Sainz, J.A., 1990. Modelos de Simulación de la calidad del Agua de los ríos Nalón, Caudal y Nora, Asturias, España: I, Establecimiento de Premodelos. Revista de Obras Publicas.
- Sainz, J.A 1990. "Modelos de Simulación de la calidad del Agua de los ríos Nalón, Caudal y Nora, Asturias, España: II, Calibrado de Modelos. Establecimiento de Premodelos". Revista de Obras Publicas.
- Sainz, J.A 1990. "Modelos de Simulación de la calidad del Agua de los ríos Nalón, Caudal y Nora, Asturias, España: 1, Validación de Modelos. Revista de Obras Publicas.

- Shanahan, P., Henze, M., Koncsos, L., Rauch, W., Reichert, P., Somlyódy, L., 1998. River water quality modelling: II. Problems of the art. *Water Science Technology*;38(11):245–252.
- Streeter, H.W., Phelps, E.B., 1925. A study of the pollution and natural purification of the Ohio river. Vol III, *Public Health Bulletin*, U.S. Public Health Service;146.
- Thompson, D.H., 1925. Some observations on the oxygen requirements of fishes in the Illinois River, 111. *Nat. Hist. Surv. Bull*;15:423–437.
- Usepa, 1986. Quality criteria for water. *Gold Book Quality Criteria*, EPA 440/5-86-001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington.
- Uzunov, Y., Nuttle, T., Nakova, E., y Varadinova, E. (2006) Dissolved oxygen in the River Mesta (Bulgaria): a case study for qualitative modelling of sustainable development. Consultado en internet mayo 2007. [www.cs.dartmouth.edu/~qr06/papers/uzunov-nuttle-nakova-varadinova-qr06.pdf](http://www.cs.dartmouth.edu/~qr06/papers/uzunov-nuttle-nakova-varadinova-qr06.pdf) -
- Vargas, J., 2003. *Calidad del Agua en Espacios Naturales: Impacto y Modelación*. Seminario Internacional. Restauración Hidrológico Forestal para la Conservación y Aprovechamiento de Aguas y Suelo. [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <[eias.entalca.cl/Seminario/Exposiciones](http://eias.entalca.cl/Seminario/Exposiciones)>.
- Whitehead, P.G., R.J. Williams., 1997. Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development. *The Science of the Total Environment*; 447-456.

## **9 ANEXOS**

### **9.1 Guía del Usuario. MOSIOD**



# **GUIA RAPIDA MOSIOD**

Modelo de Simulación de Oxígeno  
Disuelto

Herramienta computacional desarrollada bajo una aplicación de Visual Basic. NET que presenta amigabilidad en el ingreso de datos, además del manejo de un entorno grafico para los perfiles longitudinales de los resultados.

**Elián Alvis Camacho  
Edgardo jose Nieves  
Marzo de 2008**

## INTRODUCCION

La información en este documento ha sido financiada en parte por recursos propios de los investigadores y el grupo de investigación Control de la Contaminación Ambiental de la Universidad del Magdalena. La herramienta está sujeta a la revisión administrativa y tiene actualmente todavía ser aprobada para la publicación como un documento oficial. La mención de los nombres comerciales o de los productos comerciales no constituye el endoso o la recomendación para el uso por agencias de protección del medio ambiente de Colombia.

El MOSIOD descrito en este manual se debe utilizar en propio riesgo del usuario. Ni Universidad, ni el Grupo de Investigación Control de la contaminación Ambiental, ni los autores del programa pueden asumir la responsabilidad de la operación, de la salida, de la interpretación o del uso modelo.

## INGRESO DE DATOS

### 1. Hidráulica.

#### 1.1. Características Hidráulica

**1.1.1. Caudal Inicial ( $m^3/s$ )** : Dato medido en el punto inicial de la modelación.

**1.1.2. Longitud a Modelar (Km)**: Definir la longitud total que se emplea en la modelación.

**1.1.3. Run**: Botón utilizado para correr las características hidráulicas en la simulación.

**1.1.4. Grafica**: Se utiliza para mostrar las graficas generadas en la modelación del MOSIOD.

**1.1.5. Resul Hora**: Este es utilizado en la modelación de los datos de concentración y carga ingresados en el MOSIOD.

**1.1.6. Tramos**: Seleccionar la cantidad de segmentos que empleará para modelar. El máximo es 15.

**1.1.7. Para cada tramo ingresar:**

- **Nombre del tramo.**
- **Nombre del tramo aguas abajo.**
- **Longitud (km).**
- **Ubicación aguas abajo del tramo (km).**
- **Altura sobre el nivel del mar inicial (m).**

- **Altura sobre el nivel del mar final (m).**
- **Latitud.** Grados, minutos y segundos.
- **Longitud.** Grados, minutos y segundos
- **Ancho inferior del canal (m).**
- **Inclinación lateral derecha (m/m).**
- **Inclinación lateral izquierda (m/m).**
- **Coefficiente de manning (n).** Los valores para el coeficiente de rugosidad manning se encuentran en tabla.
- **Inclinación del canal (m/m).**
- **Coefficiente de Reacción Ka (1/d).** Hay cuatro posibilidades de cálculo: Por la fórmula de O'Connor-Dobbins (O'Connor and Dobbins 1958), la formula de Churchill (Churchill et al. 1962), formula de Owens-Gibbs (Owens et al. 1964) y la formula de Internal (Covar 1976). También se puede especificar el valor del coeficiente.
- **Coefficiente de remoción Kr (1/d)**
- **Coefficiente de desoxigenación Kd (1/d)**

MOSIOD

Hidraulica | Datos de Concentración y Carga | Tabla de Resultados | Resultado del Modelo | Grafica

Características Hidraulicas | Fuentes | Datos Observados

Caudal Inicial :  Longitud a Modelar  Run Graficar Result Hora

Tramos: 7 + -

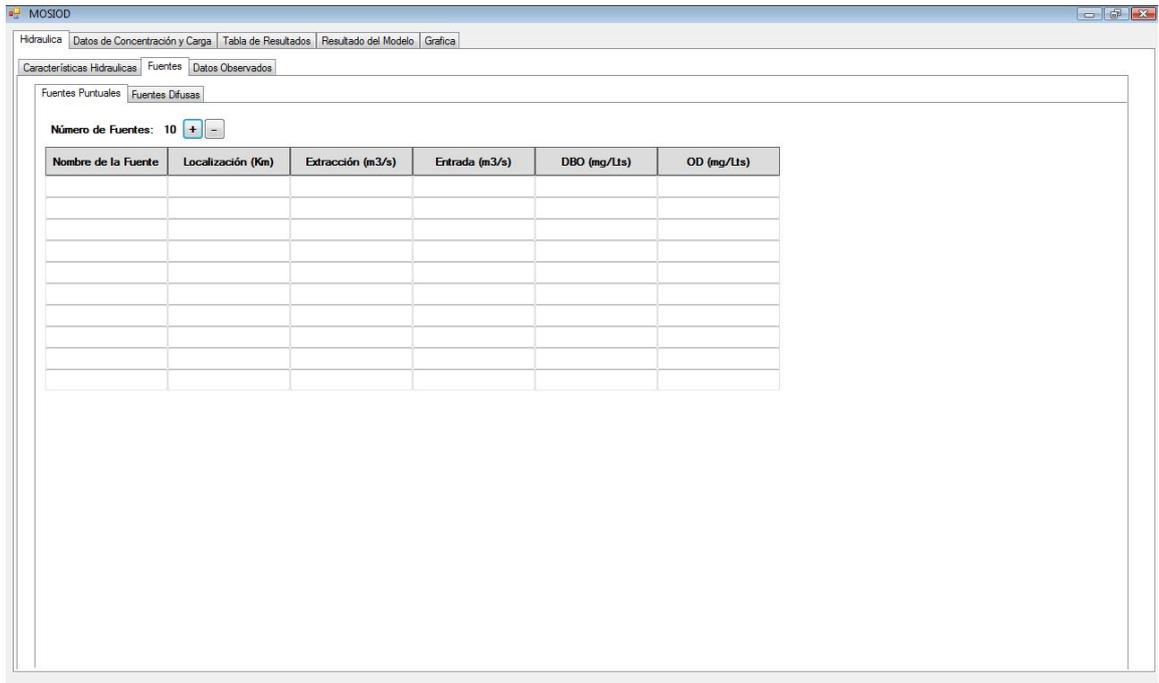
	Tramo1	Tramo2	Tramo3	Tramo4	Tramo5	Tramo6	Tramo7
Nombre del Tramo							
N.T. Aguas Abajo							
Longitud (Km)							
Ubi. Ag. Abajo (Km)							
A.S. Nivel mar	Inicial						
	Final						
Tramo	Latitud	Grados					
		Minutos					
		Segundos					
Longitud		Grados					
		Minutos					
		Segundos					
Anc. Inf. Canal (Mts)							
Incl. Lat. Derecha							
Incl. Lat. Izquierda							
Manning (n)							
Inclinación del Canal							
Modelos de Reareación	Espec	Espec	Espec	Espec	Espec	Espec	Espec
C. Reareación Ka							
C. Remoción Kf							
C. Desoxigenación Kd							

Grafica 1. Características Hidráulicas.

## 1.2. Fuentes:

1.2.1. **Fuentes puntuales:** Ingresar los datos hidráulicos y químicos de la descarga de contaminantes en localizaciones específicas.

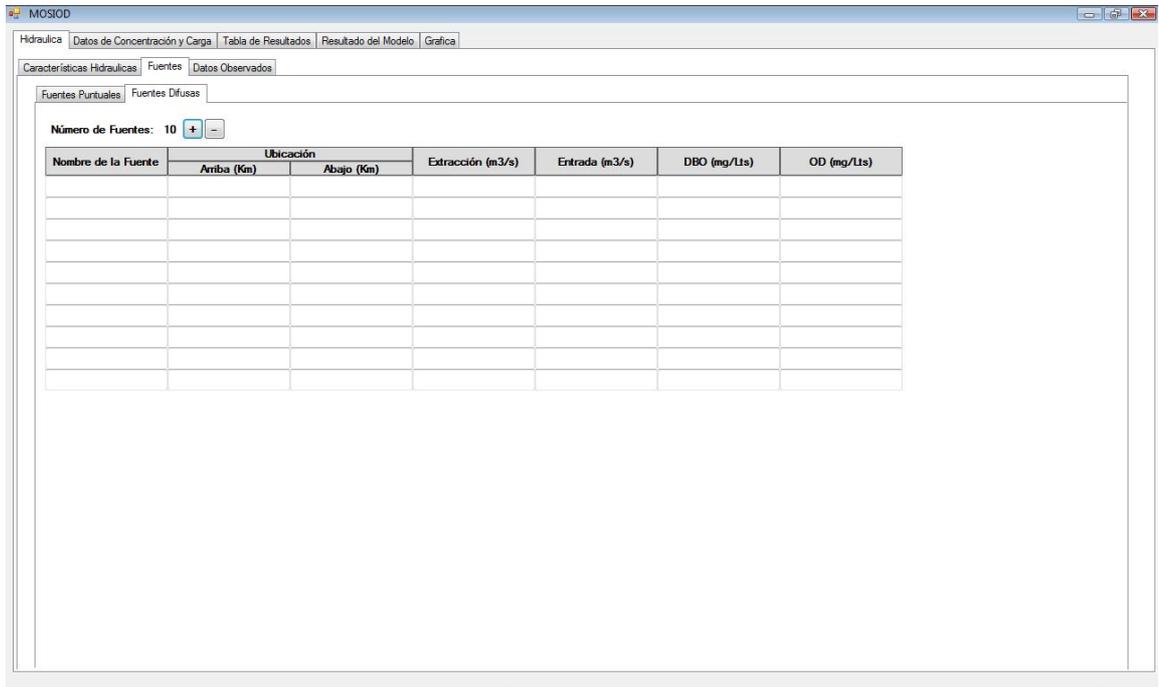
- **Nombre de la fuente**
- **Localización (Km)**
- **Extracción (m<sup>3</sup>/s)**
- **Entrada (m<sup>3</sup>/s)**
- **DBO (mg/l)**
- **OD (mg/l)**



**Grafica 2. Fuentes puntuales.**

**1.2.2. Fuentes difusas:** Definir los valores hidráulicos y químicos observados en campo, sobre una región extensa que tiene influencia de descarga contaminante.

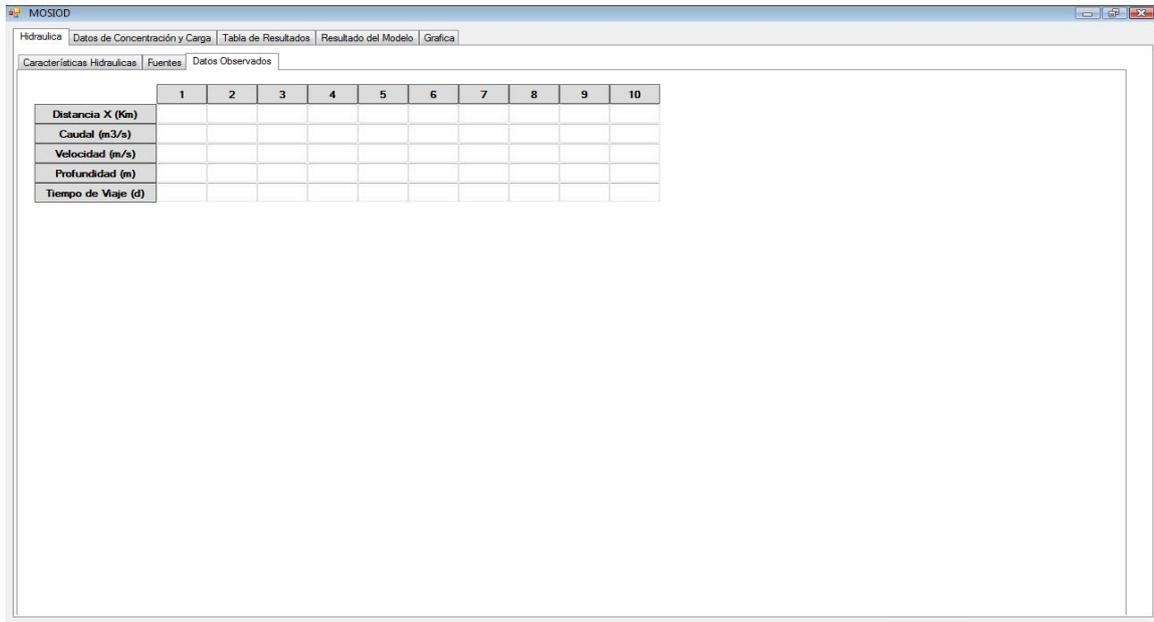
- **Nombre de la fuente**
- **Ubicación arriba (Km)**
- **Ubicación abajo (Km)**
- **Extracción (m<sup>3</sup>/s)**
- **Entrada (m<sup>3</sup>/s)**
- **DBO (mg/l)**
- **OD (mg/l)**



**Grafica 3. Fuentes difusas.**

**1.2.3. Datos observados:** Ingresar datos de Oxigeno Disuelto (OD) y hidráulicos medidos en campo.

- **Distancia (Km)**
- **Caudal (m<sup>3</sup>/s)**
- **Velocidad (m/s)**
- **Profundidad (m)**
- **Tiempo de viaje (d)**
- **Oxigeno disuelto (mg/l)**



**Grafica 4. Datos observados.**

**2. Datos de concentración y carga:** Ingresar los datos de los siguientes parámetros medidos en el punto inicial de la modelación para cada hora durante veinticuatro horas (24h).

**2.1. Temperatura (°C)**

**2.2. Oxígeno Disuelto (mg/l)**

**2.3. Demanda Biológica de Oxígeno, DBO (mg/l)**



4. **Resultados del modelo:** Se visualiza la tabla con los resultados de OD para un periodo de veinticuatro horas (24h) por tramo y los valores promediado para cada tramo, generado al pinchar Resul hora.

#### 4.1. Tabla de resultados por hora

Tiempo	Nombre Tramo	N.T. Aguas Abajo	Arriba (Km)	Abajo (Km)	Extracción (m³/3/s)	Entrada (m³/3/s)	Temperatura °C	Oxígeno Disuelto (mg/O2/l)
12:00 am	Presa	Q.Matogiro	0	1,05			18,6	8,0656013579001
	Q.Matogiro	Q.AR Bonda	1,05	1,925			18,6	8,5441670980114
	Q.AR Bonda	Q.Volqueta	1,925	4,075			18,6	8,5081551828504
	Q.Volqueta	Q.Mojada	4,075	4,45			18,6	8,449921522425C
	Q.Mojada	Q.Seca	4,45	4,95			18,6	8,378535543141E
	Q.Seca	Q.Tamaca	4,95	15,075			18,6	7,018338098494E
	Q.Tamaca	Desembocadur	15,075	17,5			18,6	4,826330859349C
	Desembocadur	Q.Matogiro	0	1,05			18,6	8,0656013579001
1:00 am	Presa	Q.Matogiro	0	1,05			18,6	8,0656013579001
	Q.Matogiro	Q.AR Bonda	1,05	1,925			18,6	8,5441670980114
	Q.AR Bonda	Q.Volqueta	1,925	4,075			18,6	8,5081551828504
	Q.Volqueta	Q.Mojada	4,075	4,45			18,6	8,449921522425C
	Q.Mojada	Q.Seca	4,45	4,95			18,6	8,378535543141E
	Q.Seca	Q.Tamaca	4,95	15,075			18,6	7,018338098494E
	Q.Tamaca	Desembocadur	15,075	17,5			18,6	4,826330859349C
	Desembocadur	Q.Matogiro	0	1,05			18,9	8,018601085790C
2:00 am	Presa	Q.Matogiro	0	1,05			18,9	8,018601085790C
	Q.Matogiro	Q.AR Bonda	1,05	1,925			18,9	8,4942633360641
	Q.AR Bonda	Q.Volqueta	1,925	4,075			18,9	8,457865421001E
	Q.Volqueta	Q.Mojada	4,075	4,45			18,9	8,401407843191C
	Q.Mojada	Q.Seca	4,45	4,95			18,9	8,331011288094C
	Q.Seca	Q.Tamaca	4,95	15,075			18,9	6,978448797847E
	Q.Tamaca	Desembocadur	15,075	17,5			18,9	4,803888598700E
	Desembocadur	Q.Matogiro	0	1,05			19,2	7,972691268333C
3:00 am	Presa	Q.Matogiro	0	1,05			19,2	7,972691268333C
	Q.Matogiro	Q.AR Bonda	1,05	1,925			19,2	8,444909705700E
	Q.AR Bonda	Q.Volqueta	1,925	4,075			19,2	8,408139762084E
	Q.Volqueta	Q.Mojada	4,075	4,45			19,2	8,353429311081E
	Q.Mojada	Q.Seca	4,45	4,95			19,2	8,284013768105E
	Q.Seca	Q.Tamaca	4,95	15,075			19,2	6,939053162074E
	Q.Tamaca	Desembocadur	15,075	17,5			19,2	4,781783722080C
	Desembocadur	Q.Matogiro	0	1,05			19,2	7,972691268333C
4:00 am	Presa	Q.Matogiro	0	1,05			19,2	7,972691268333C
	Q.Matogiro	Q.AR Bonda	1,05	1,925			19,2	8,444909705700E

Grafica 7. Tabla de resultados por hora.



## 5.2. Altura lamina de agua (m)



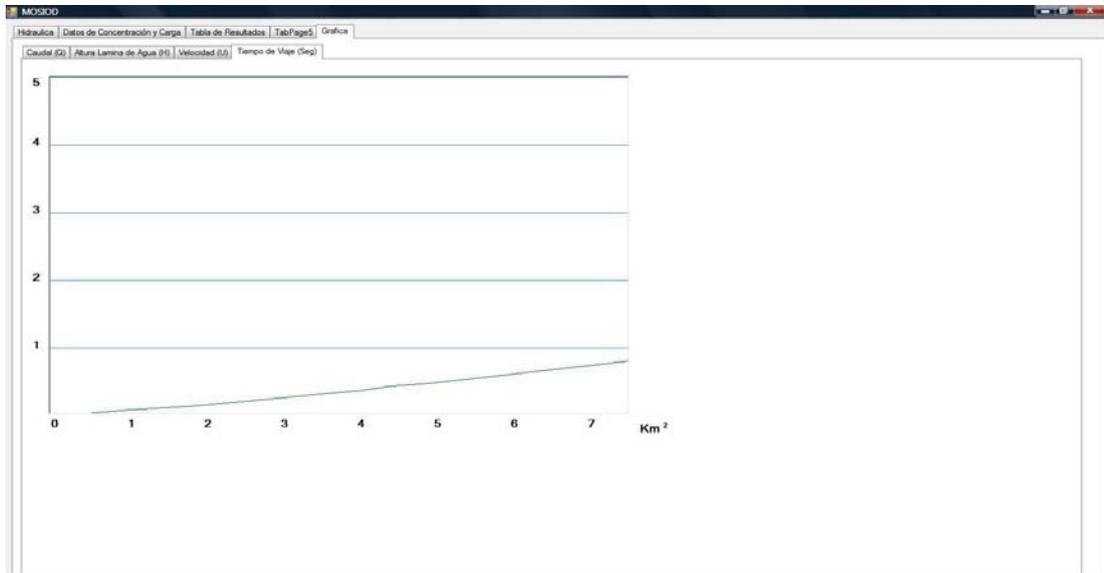
Grafica 10. Altura lamina de agua.

## 5.3. Velocidad (m/s)



Grafica 11. Velocidad.

#### 5.4. Tiempo de viaje (d)



Grafica 12. Tiempo de viaje.

#### 5.5. Oxígeno disuelto (mg/l)



Grafica 13. Oxígeno Disuelto.