



Autoridad Nacional  
de Licencias Ambientales



2026

# GUÍA EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE **MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS** DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS

**Elaboró:**

**Luisa Fernanda Valencia Casas**

Líder Técnica grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo

**Revisó:**

**Yuli Carolina Velandia Roncancio**

Líder Técnica grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo

**Aprobó:**

**Oscar Alexander Varila Quiroga**

Coordinador grupo de Regionalización y Centro de Monitoreo

**Jorge Alberto Sanabria Morales**

Subdirector Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales



<p><b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b></p>	<p><b>GUÍA</b>  <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b></p>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

## 1. Introducción

El desarrollo del país a través de diferentes proyectos, obras o actividades (POA's) cada vez más relevantes y ambiciosas, hace que el estado actual y futuro de los recursos naturales sea de gran importancia en aras de lograr un desarrollo sostenible. Lo que ha llevado desde diferentes sectores a la implementación de modelaciones numéricas de los recursos naturales con un enfoque ambiental, que permiten simular los cambios que podrían presentarse en la cantidad y calidad del recurso como resultado de la ejecución de POA's en un área o región del territorio.

El creciente análisis del comportamiento de las aguas subterráneas ante las distintas presiones que ejercen los POA's sobre el recurso a través de modelaciones numéricas genera la necesidad de identificar criterios relevantes en la concepción y construcción de los modelos, que brinden un enfoque adecuado y permitan obtener resultados fiables para la toma de decisiones de carácter ambiental. Es por ello que, el Centro de Monitoreo de los Recursos Naturales de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ha elaborado esta guía basada en criterios y guías internacionales, aunada a la experiencia que ha adquirido en el territorio, con el fin de orientar a los modeladores y servir de referente en relación con los aspectos que deben ser considerados para la definición del área de modelación, selección del código de cálculo, discretización, datos de entrada, calibración, validación, análisis de sensibilidad, elaboración de escenarios predictivos, resultados y presentación del reporte de modelación; de forma que los distintos usuarios presenten modelos numéricos concordantes con la realidad del proyecto y de la zona donde se encuentran localizados, y, además, facilite a esta Autoridad su revisión y futura reproducción.

## 2. Objetivo

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer buenas prácticas para la modelación hidrogeológica del recurso hídrico subterráneo, mediante lineamientos técnicos, criterios mínimos de información y procedimientos estandarizados, con el fin de garantizar resultados trazables, comparables y útiles para la evaluación ambiental de la ANLA y su adopción por actores externos.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Unificar criterios y requisitos de datos para la modelación hidrogeológica, incluyendo reglas de calidad, representatividad y control, así como la adecuada espacialización y temporalidad, a fin de asegurar insumos comparables y trazables.
2. Estandarizar el ciclo de modelación hidrogeológica considerando las guías internacionales y enfocando su aplicación al licenciamiento ambiental, con el propósito de fortalecer el rigor técnico y la reproducibilidad.
3. Definir los entregables de los modelos necesarios para la toma de decisiones, precisando estructura y formatos, metadatos, contenidos técnicos y trazabilidad de resultados, de manera que se facilite la revisión, el uso y la integración de los productos por parte de la ANLA.

## 3. Alcance

Esta guía contiene lineamientos sobre buenas prácticas de modelación de aguas subterráneas, la cual aplica para la elaboración de modelos hidrogeológicos numéricos de flujo saturado que los usuarios presentan a esta Autoridad Ambiental durante las diferentes etapas del licenciamiento ambiental como herramienta para la toma de decisiones en relación con los posibles impactos ambientales que los POA's pueden generar en el recurso.

Dado que actualmente el país no cuenta con una guía nacional para la modelación de aguas subterráneas, la presente busca ser un referente en la forma en que se deben abordar los modelos hidrogeológicos numéricos, incluyendo aspectos y lineamientos que garanticen la construcción de escenarios representativos de la realidad en el territorio y resultados prospectivos fiables, asociados a la posible generación de impactos ambientales sobre el recurso. Aclarando que, no pretende imponer un instrumento y que cuando el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible adopte oficialmente una Guía Nacional de Modelación de Aguas Subterráneas, este documento será revisado y actualizado.

## 4. Definiciones


**Acuífero:** Formación geológica permeable capaz de almacenar, transmitir y proporcionar cantidades aprovechables de agua.

**Acuitardo:** Formación geológica de baja conductividad hidráulica que transmite agua muy lentamente.

**ANLA:** Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.

**Calibración de un modelo:** Proceso por el cual los parámetros de un modelo se ajustan para obtener concordancia entre los resultados generados por el modelo y los valores medidos de las variables.

**Condiciones iniciales:** Descripción de los valores de cada variable en el tiempo inicial en cada uno de los puntos en un modelo transitorio.

	<b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRANEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

**Conductividad hidráulica:** Propiedad que mide la facilidad con la que el agua (u otro fluido) se mueve a través de los poros, fracturas y espacios intergranulares de la roca, indicando qué tan permeable es; se expresa como la velocidad de flujo y es crucial para entender el movimiento de aguas subterráneas y la estabilidad de estructuras geológicas.

**Discretización espacial:** División del dominio espacial de un modelo en una malla regular o irregular en una, dos o tres dimensiones.

**Discretización temporal:** División del dominio temporal en incrementos finitos.

**Dominio de un modelo:** Parte de un sistema hídrico delimitada por contornos bien definidos en la que se calculan las variables de un modelo.

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

**MAG:** Modelo de almacenamiento geográfico.

**MHC:** Modelo hidrogeológico conceptual.

**MHN:** Modelo hidrogeológico numérico.

**Modelo conceptual:** Representación simplificada de una situación real descrita en términos de diagramas, organigramas, relaciones entre variables o leyes naturales.

**Modelo de flujo subterráneo:** Representación matemática, analítica o numérica simplificada del flujo de agua a través de un medio poroso y/o fracturado que simula el flujo subterráneo mediante una ecuación de gobierno y a ecuaciones que describen las cargas y los flujos en los límites del dominio de flujo.

**Número de Courant:** es la relación entre el producto de la velocidad advectiva baja y el paso de tiempo, dividido por el tamaño de la celda de la cuadrícula. El número de Courant debe ser inferior o igual a la unidad, lo que básicamente significa que, durante un paso de tiempo dado, una partícula de soluto no puede atravesar más de una celda del modelo (Barnett, y otros, 2012).

**Número de malla de Peclet:** Es la relación entre el tamaño de la celda y la dispersividad. Se ha comprobado que los valores del número de Peclet inferiores a cuatro (4) suelen ser eficaces para suprimir las oscilaciones artificiales, pero algunos autores han comprobado que los valores de hasta 10 funcionan. Los problemas puramente advectivos tienen una dispersividad nula y, por lo tanto, un número de Peclet infinito; requieren técnicas de solución Lagrangianas (Lagrangian) o mixtas Euleriano-Lagrangianas (Eulerian-Lagrangian) (Barnett, y otros, 2012).

**POA:** Proyecto, obra o actividad

**Régimen estacionario:** Se refiere a la representación de un sistema o proceso en un estado de equilibrio estable, donde las variables que lo definen permanecen constantes en el tiempo.

**Simulación:** 1) Proceso que utiliza un programa informático para reproducir o representar fenómenos reales mediante un modelo hidrológico numérico. 2) Salida de computadora de un modelo hidrológico numérico.

**Transmisividad:** Volumen de agua que fluye por unidad de tiempo a través de una sección vertical del acuífero de un metro de ancho y todo su espesor saturado, con un gradiente hidráulico unitario (un metro de caída por metro de distancia).

**Validación de un modelo:** Evaluación de la capacidad de un modelo específico de un lugar para proporcionar predicciones suficientemente precisas.

## 5. Normativa

Tipo	Número	Fecha	Epígrafe	Artículos
Decreto	1076	26-05-2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Todo el documento


## 6. Documentos Asociados

Nombre
NA

## 7. Desarrollo

### 7.1 OBJETIVO Y ALCANCE DE LA MODELACION HIDROGEOLOGICA

El objetivo y el alcance de la modelación deben establecerse claramente en términos específicos y medibles, y deben ser adecuados a su finalidad, ya que el modelo debe ser desarrollado para satisfacer unos objetivos específicos del proyecto. Los modelos que se construyen para ser presentados ante Autoridades Ambientales deben estar enfocados en representar el comportamiento de las aguas

	<b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRANEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

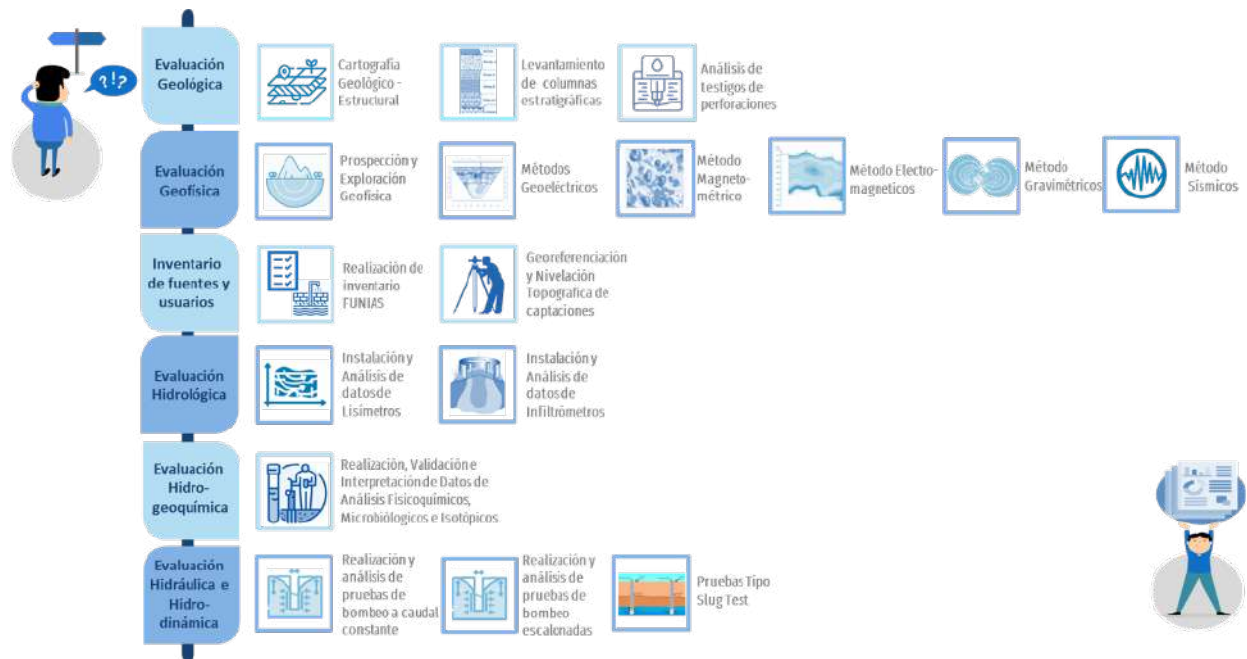
subterráneas ante el desarrollo de POA's, por lo que las predicciones del modelo deben ser lo suficientemente sólidas y fiables, de tal manera que permitan al usuario plantear medidas de manejo ambiental apropiadas y facilitar a la Autoridad Ambiental la toma de decisiones ante los posibles impactos que se pueden presentar en el recurso. Los objetivos del modelo deben establecerse claramente antes de que comience el desarrollo de este, debido a que juegan un papel importante en el desarrollo de las diferentes fases de modelación como en la selección del código o software, definición del dominio, construcción de la malla, entre otros; a fin de garantizar que el modelo resultante sea adecuado para su propósito.

## 7.2 INVESTIGACION PRELIMINAR

Para la realización del modelo hidrogeológico conceptual (MHC) y su posterior implementación en el modelo hidrogeológico numérico (MHN) se debe realizar la recopilación de información secundaria para la caracterización del hidrosistema subterráneo, a partir de un análisis de vacíos de información, se debe ejecutar el levantamiento en campo de la información faltante o complementaria.

En la Figura 7-1 se presenta la información mínima requerida para la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico, adaptado de la Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014), la cual abarca las siguientes temáticas: geología, geofísica, inventario de puntos de agua subterránea, hidrología, hidroquímica, hidráulica subterránea, entre otros

Figura 7-1. Información Hidrogeológica para la construcción de modelo hidrogeológico conceptual y numérico - Metodos Directos



Fuente: Adaptado de MADS, 2014.


	<b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

Figura 7-2. Información Hidrogeológica para la construcción de modelo hidrogeológico conceptual y numérico - Metodos Indirectos



Fuente: Adaptado de MADS, 2014.

### 7.3 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual (MHC) es principalmente una representación cualitativa del sistema hidrogeológico en dos o tres dimensiones que incluye las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos, sintetizando información sobre las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterráneas en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficiales y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada (IDEAM, 2023). EL MHC puede incluir alguna información o análisis cuantitativos, que ayudan a comprender el sistema, siendo una de las partes más importantes del modelo de aguas subterráneas (DPE, 2022).

Los procesos iterativos de modelación conceptual y numérica deben utilizarse para guiar la recolección de datos adicionales, lo que conducirá a una comprensión más avanzada del sistema de aguas subterráneas. Además, la comparación de múltiples modelos conceptuales permite comprobar los supuestos sobre los procesos que tienen lugar en el dominio de modelación.

#### 7.3.1 Definición de los procesos y variables a simular

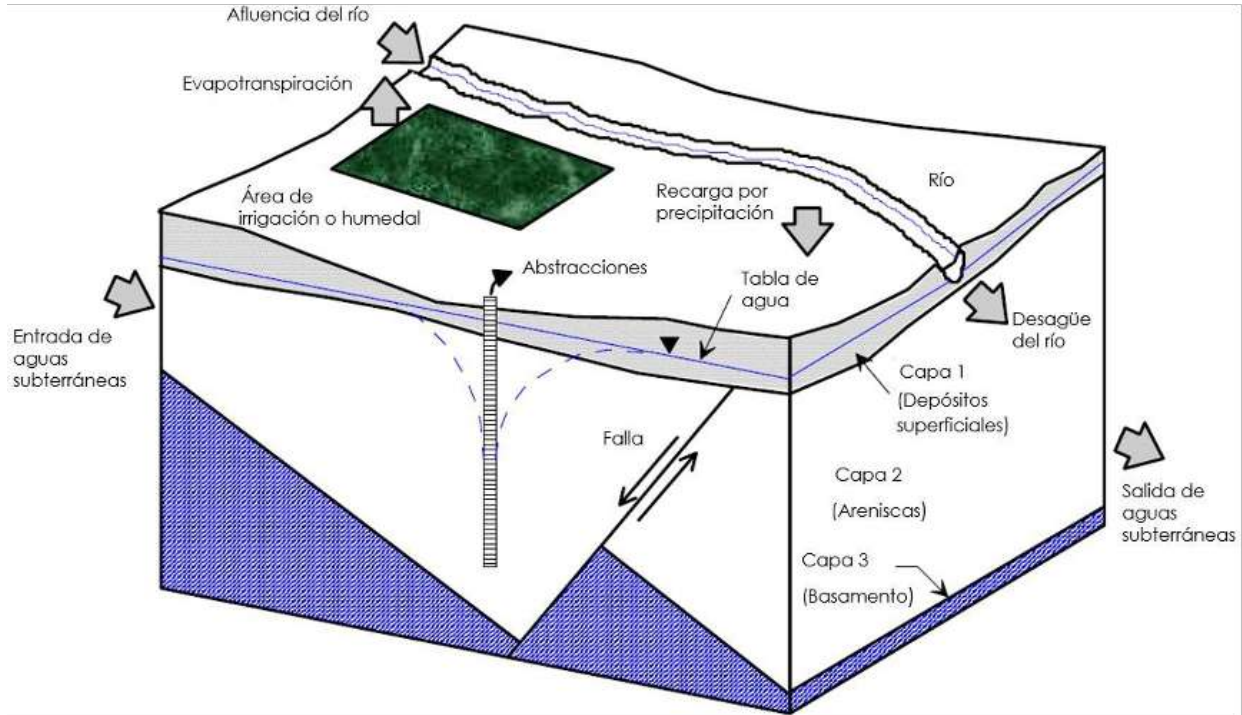
El MHC debe ser la descripción más simple posible del sistema, incluyendo al mismo tiempo todos los procesos relevantes y conteniendo suficiente información para representar el comportamiento del sistema. Este concepto requiere que se incluyan en el MHC todas las características o procesos relevantes que razonablemente se espera que ocurran en el dominio del modelo. También es imperativo que todos los procesos incluidos en el modelo conceptual se incluyan en el modelo numérico, y viceversa (DPE, 2022).

Entre los aspectos importantes del MHC figuran el marco geológico e hidrogeológico, la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas, interacción entre las aguas superficiales y subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga, las discontinuidades hidrogeológicas, las características climatológicas, los componentes del balance de las aguas subterráneas, el marco geológico estructural y las características geoquímicas.

#### 7.3.2 Esquematación del sistema

Como resultado de la construcción del MHC, la esquematización del sistema consiste en la elaboración de un diagrama de bloque que represente las condiciones descritas, donde se pueda visualizar la topografía del modelo, la profundidad y distribución de las unidades geológicas, la localización de los sistemas acuíferos y su posible conexión con cuerpos de agua superficiales, las direcciones y gradientes de flujo, la identificación de flujos locales y/o regionales, las zonas de recarga, tránsito y descarga, así como los diferentes elementos que sean representativos y aporten al entendimiento del sistema hidrogeológico.

Figura 7-3. Diagrama de bloque típico de un MHC.



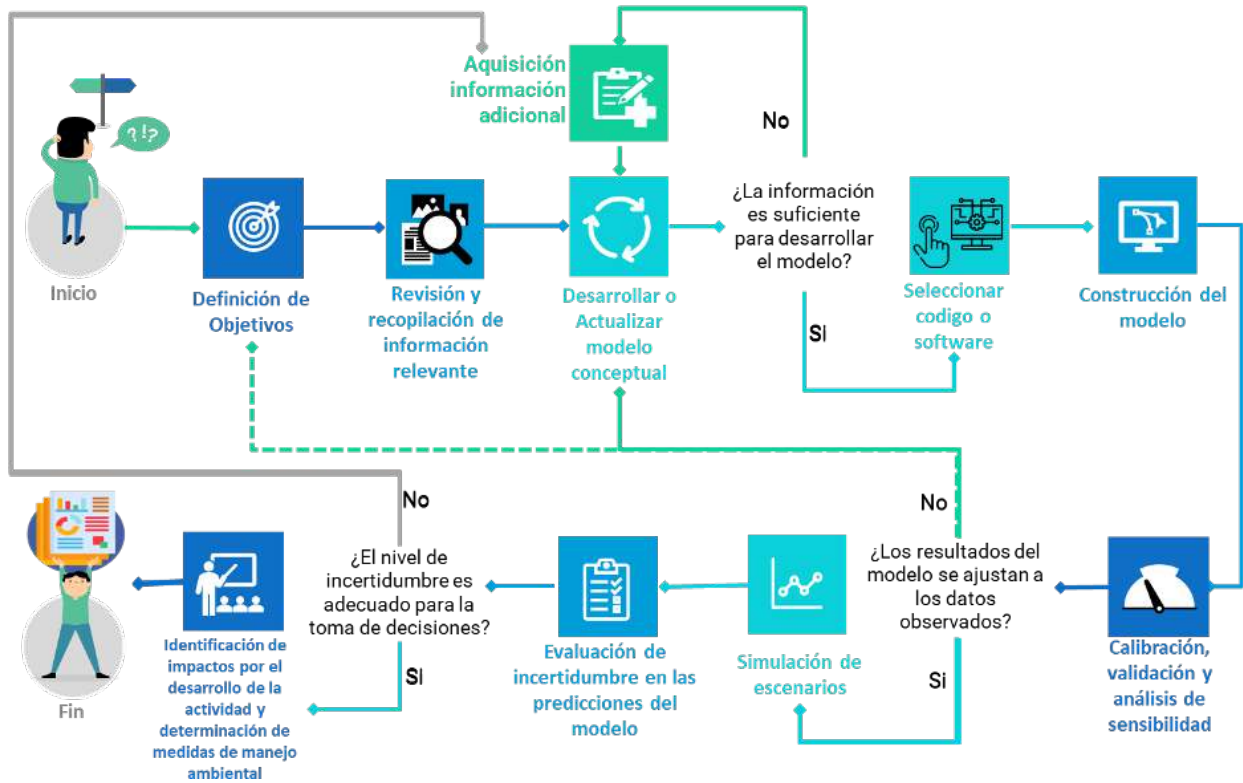
Fuente: Ajustado de Middlemis, 2000.

#### 7.4 SELECCIÓN Y DESARROLLO DEL MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO

Los modelos numéricos que se emplean habitualmente para la evaluación de impactos al recurso hídrico subterráneo, deben tener en consideración factores como la superficie a simular, la escala temporal para evaluar dichos impactos, la presencia de múltiples acuíferos, múltiples usuarios de aguas subterráneas, las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas, así como la fusión de datos, impactos y modelos de múltiples proyectos; por lo que la construcción del MHN requiere la previa elaboración por parte del usuario de un MHC sólido del proyecto y la zona, donde preferiblemente se contemple la inclusión de proyectos vecinos, en el marco de la evaluación de impactos acumulativos.

Del MHC se obtiene la información necesaria para conocer el comportamiento de las aguas subterráneas en el área de estudio, que debe incluir mínimo: Evaluación de la disponibilidad de datos, hidroestratigrafía, límites geológicos e hidrogeológicos, identificación de los receptores sensibles, calidad del agua e intrusión de agua salada (si procede), descripción del dominio hidrogeológico, propiedades hidráulicas del acuífero y/o acuitardo, evaluación de la interacción agua subterránea - agua superficial, identificación de zonas de recarga y descarga, cuantificación de fenómenos externos al modelo que pueden ser fuentes o sumideros, y evaluación de la incertidumbre del modelo conceptual. En la Figura 7-4 se presenta el diagrama del proceso de modelación numérica para aguas subterráneas que se aborda en este documento.

Figura 7-4 Modelación numérica



Fuente: ANLA, 2023.

#### 7.4.1 Criterios de Selección del Software

La ecuación de flujo de agua subterránea no cuenta con una solución analítica exacta, y por lo tanto se debe estimar una solución aproximada a través de métodos numéricos. Los softwares/códigos (comerciales y de libre acceso) en su mayoría resuelven esta ecuación a través de elementos finitos y diferencias finitas y con ambos métodos se pueden obtener resultados similares. Dependiendo del software/código a utilizar los modelos de flujo de aguas subterráneas tienen asociados diferentes datos de entrada, diferentes parámetros y resultados; sin embargo, son las preguntas formuladas por el modelador y la resolución requerida el principal factor para la selección del modelo numérico a emplear, por lo que se deben incluir las diferentes consideraciones para su selección, ver Tabla 7-1 Tabla 7-1.

Esta Autoridad Ambiental acepta cualquier software/código, siendo fundamental que la implementación del modelo incluya todos los elementos, procesos y condiciones que fueron identificados en el modelo conceptual, y permita así una correcta representación del sistema hidrogeológico.


	<b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

Tabla 7-1. Comparativo de algunos software y códigos existentes.

OBJETIVO	TIPO DE FLUJO	APLICACIÓN PRÁCTICA	SOFTWARE / CÓDIGO															
			GMS	FEFLOW	Visual MODFLOW	MODFLOW	MODFLOW SURFACT	Groundwater Vistas	Model Muse	Hydrus 1D	Hydrus 2D/3D	SEAWAT	MIKE SHE	VS2DI	SUTRA	HydroGeo Sphere	SEEP/W, CTRAN/W	TOUGH2
Modelar flujo	Flujo saturado	Aplicable a la mayoría de los problemas prácticos.	X	X	X	X	X	X	X			X			X	X	X	
	Flujo no saturado	Importante para casos donde sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración.	X	X			X	X		X			X	X	X	X		
	Flujo con densidad variable	Fundamental para la representación correcta de la dinámica de flujos en salares y acuíferos costeros.	X	X	X	X						X			X	X		
	Flujos en acuíferos fracturados y medios kársticos	Uso para condiciones muy particulares en las cuales existe una marcada anisotropía del sistema que se busca representar.	X	X	X			X										
Modelar transporte	Flujo saturado	Aplicable a la mayoría de los problemas prácticos.	X	X	X	X	X	X	X			X			X	X	X	X
	Flujo no saturado	Importante para casos donde sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración.	X	X			X			X	X		X	X	X	X		

Fuente: Ajustado de (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012) y (Barnett, y otros, 2012).

#### 7.4.2 Condiciones Espaciales

El dominio de modelación (El dominio de modelación puede ser diferente al área de influencia ambiental) debe incluir las áreas donde ocurren los procesos que se quieren analizar. El área seleccionada debe permitir verificar hasta donde trascienden los impactos a las aguas subterráneas, lo cual es un insumo en la delimitación del área de influencia ambiental del componente. Los límites deben ser representados mediante condiciones de frontera conocidas o simples de establecer. Se debe establecer el límite superior o techo, límite inferior o piso y límites laterales (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012). Generalmente el límite superior coincide con la superficie del terreno para acuíferos libres o semiconfinados, en acuíferos confinados se considera el contacto con la formación confinante. Sin embargo, en ocasiones es necesario representar componentes de ingeniería producto de la actividad (e.g. Presas de relaves, contradiques, botaderos - rellenos sanitarios, etc.) y que tienen asociadas fases de crecimiento o avance, las cuales se deben representar en el modelo sobre la superficie del terreno. El límite inferior corresponderá a una formación de baja permeabilidad o basamento hidrogeológico. Por otro lado, los límites laterales pueden ser establecidos por sistemas estructurales de baja permeabilidad, cuerpos de agua, cambios en la formación geológica, entre otros.


Se debe tener especial cuidado en no seleccionar un dominio demasiado restrictivo, que limite la simulación de los fenómenos que se desean analizar, asegurándose que los resultados a obtener (presiones, conos de depresión/abatimiento, etc.) no se vean interrumpidos o restringidos por la frontera del modelo, colocando en duda las predicciones que este puede realizar (DPE, 2022).

##### 7.4.2.1 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera o de borde deben ser seleccionadas en concordancia con la dinámica del sistema, su selección permite definir los límites físicos del dominio del modelo, fijando además aspectos relevantes que inciden en su comportamiento. Estas condiciones son las propiedades del flujo en los límites físicos, definidas por una expresión matemática del estado del sistema de aguas subterráneas en el dominio, que restringen las ecuaciones que componen el modelo matemático. Los tres principales tipos de condiciones de borde, las cuales pueden variar en el tiempo, se caracterizan como de carga hidráulica o cabeza definida (condiciones de Dirichlet), de flujo específico (condiciones de Neumann) y flujo en función de la cabeza (condiciones de Cauchy) (DPE, 2022).

Estas condiciones de frontera son uno de los factores clave en la simulación de la dinámica de las aguas subterráneas en respuesta a las tensiones impuestas por las actividades que se desean simular (Nevada Division of Environmental Protection, 2018). Su elección es de suma importancia en la construcción de un MHN, dado que permite definir los límites físicos del dominio de modelación y, además, fija aspectos clave que inciden en su comportamiento.

Debido a la relevancia de las condiciones de frontera en la construcción del MHN se recomienda realizar una revisión detallada desde el MHC para su implementación en el MHN, de forma que se representen correctamente las condiciones que generen recarga, extracción de agua, flujos regionales, barreras, etc. (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012). A continuación, se presentan algunas sugerencias útiles para su definición:

 <p><b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b></p>	<p><b>GUÍA</b></p> <p><b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b></p>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

- Evitar sobreponer condiciones de frontera en una misma celda o nodo.
- Especial cuidado al definir bordes con condiciones de altura de nivel freático conocido, para evitar generación de fuentes o sumideros de agua infinitos. No debe utilizarse para representar sistemas ambientales sensibles ni vertientes alimentadas por aguas subterráneas.
- La condición de río es adecuada cuando se pueden presentar variaciones significativas en las condiciones hidrológicas o nivel del cauce, con el fin de determinar niveles ecológicos.
- Se recomienda utilizar condición de frontera tipo dren para representar manantiales y otras vertientes, donde la altura corresponde a la cota del terreno donde se presenta la surgencia.

#### 7.4.3 Régimen de Modelación

Se debe seleccionar el tipo de régimen para el desarrollo del modelo que mejor represente las características del sistema y los objetivos de la modelación. El régimen estacionario resulta apropiado para representar sistemas acuíferos donde los flujos naturales y los que resultan de actividades antrópicas que interactúan en el sistema, no varían significativamente. Por otro lado, la modelación en régimen transitorio es la forma adecuada de representar sistemas dinámicos, donde los flujos varían significativamente en el tiempo y cuando los objetivos de modelación consideren cambios temporales en el sistema (operación de pozos, procesos de inyección, cambios en magnitud de la recarga, entre otros).

#### 7.4.4 Discretización espacial y temporal

La definición adecuada de la extensión y orientación de la malla de modelación permite simplificar el análisis, contribuyendo en la precisión de los resultados, la convergencia y estabilidad numérica del modelo. El tamaño de las celdas o elementos del modelo debe ser lo suficientemente fino como para capturar la continuidad de las relaciones observadas en el MHC, como las estructuras de falla u otras unidades hidrogeológicas continuas, cuerpos de agua, entre otras. Cuando las unidades del modelo son demasiado gruesas, la continuidad hidrogeológica puede verse alterada de forma poco realista (Nevada Division of Environmental Protection, 2018).

Es importante considerar que una malla más densa puede generar resultados más precisos, pero requiere mayor tiempo de cálculo, haciendo en algunos casos la modelación poco práctica, por lo que se debe buscar un balance entre ambos aspectos. En ese sentido, se recomienda al momento de generar la malla considerar:

- Objetivos de la modelación.
- Heterogeneidad e isotropía del acuífero.
- Ubicación de fuentes, sumideros, zonas con altos gradientes y zonas sensibles ambientalmente.
- Esfuerzo computacional.
- Resolución deseada para los resultados.


En relación con la discretización vertical, es importante analizar el marco geológico del dominio, es decir, cuencas sedimentarias o complejos rocosos ígneos-metamórficos. Generalmente, los modelos contemplan la inclusión de las diferentes superficies que definen las capas, las cuales representan las unidades geológicas o hidrogeológicas (Estratos, intrusiones, fallas, etc.) definidas en el modelo conceptual. La base del modelo se define usualmente por el basamento impermeable o un estrato de baja permeabilidad, las capas intermedias corresponden a los contactos entre las diferentes unidades consideradas.

Por otro lado, el intervalo de tiempo a considerar en la modelación dependerá de los objetivos del modelo y del fenómeno que se busca simular, los modelos de flujo se pueden simular de forma diaria para periodos cortos de simulación y en semanas o meses para modelos a largo plazo. De igual forma, se considera posible la selección de intervalos de tiempo no homogéneos que permitan observar con más detalle los cambios que se presentan en los periodos de mayor tensión. Los intervalos de tiempo más cortos pueden resolver mejor la influencia de los cambios o externalidades repentinas, mientras que los más largos pueden ser apropiados para capturar el impacto de cambios gradualmente. La frecuencia deseada de los resultados del modelo debe tenerse en cuenta al definir los pasos de tiempo. Si se desea, los resultados pueden calcularse con una frecuencia tan alta como cada paso de tiempo; sin embargo, se debe considerar que esto incrementa los tiempos de modelación y las salidas del modelo pueden dar lugar a grandes archivos que son difíciles de gestionar.

Es importante resaltar que, la discretización espacial y temporal es fundamental para garantizar la estabilidad numérica y convergencia de los esquemas de solución de la ecuación de flujo. Dependiendo del software/código a utilizar, se deben garantizar diferentes criterios de estabilidad que establecen relaciones entre las dimensiones de la malla y paso de tiempo, tales como en número de Courant (El número de Courant es la relación entre el producto de la velocidad advectiva baja y el paso de tiempo, dividido por el tamaño de la celda de la cuadrícula. El número de Courant debe ser inferior o igual a la unidad, lo que básicamente significa que, durante un paso de tiempo dado, una partícula de soluto no puede atravesar más de una celda del modelo (Barnett, y otros, 2012), número de malla de Peclet (3 El número de malla de Peclet es la relación entre el tamaño de la celda y la dispersividad. Se ha comprobado que los valores del número de Peclet inferiores a cuatro (4) suelen ser eficaces para suprimir las oscilaciones artificiales, pero algunos autores han comprobado que los valores de hasta 10 funcionan. Los problemas puramente advectivos tienen una dispersividad nula y, por lo tanto, un número de Peclet infinito; requieren técnicas de solución Lagrangianas (Lagrangian) o mixtas Euleriano-Lagrangianas (Eulerian-Lagrangian) (Barnett, y otros, 2012), entre otros.

#### 7.4.5 Condiciones iniciales

Para la simulación en régimen transitorio es necesario definir una condición inicial y precisar un periodo de estabilización, correspondiente al tiempo que toma el modelo para que los resultados obtenidos sean coherentes e independientes de las condiciones establecidas inicialmente. Se recomienda simular inicialmente en régimen estacionario, de forma que sus resultados puedan ser utilizados como condición de inicio en el régimen transitorio; sin embargo, solo se consideran válidos los resultados obtenidos una vez alcanzado el periodo de estabilización (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012).

 <p><b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b></p>	<p><b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRANEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b></p>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

#### 7.4.6 Recarga y descarga del acuífero

La recarga y la descarga hacen parte de las condiciones de frontera que se imponen al modelo, los valores que se imponen a estas condiciones son definidos en el MHC y corresponden a los estudios hidrológicos e hidrogeológicos que se han realizado previamente en la zona. La recarga puede presentarse de forma natural o artificial, la cual corresponde a cada paso de tiempo y distribuida espacialmente en el área de modelación, generalmente se presenta en tasas de recarga (mm/año), por lo que cuando se trate de recarga artificial se debe considerar la conversión de unidades de caudal (l/s) a tasa de recarga a partir del área transversal de la celda o nodo en el modelo por la que ingresa el flujo.

De igual forma, la descarga se define por cada paso de tiempo y se distribuyen espacialmente de acuerdo con la zonificación que fue definida en el modelo conceptual (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012).

#### 7.4.7 Asignación de parámetros

Las propiedades hidráulicas asignadas a las unidades hidrogeológicas incluyen la conductividad hidráulica (K), la transmisividad (En modelación 2D) (T), el rendimiento específico (Sy), el almacenamiento específico (Ss) y la porosidad. De estos parámetros, los modelos suelen ser más sensibles a los valores de conductividad (o de la Transmisividad); esta dependencia se complica aún más, cuando existe una variación de los valores de conductividad en varios órdenes de magnitud. Los valores del coeficiente de almacenamiento (por ejemplo, Sy, Ss) pueden ser importantes en las simulaciones de modelos transitorios, pero el rango de los parámetros del coeficiente de almacenamiento suele ser pequeños comparados con el de los valores de conductividad (Nevada Division of Environmental Protection, 2018).

Los rangos de valores a asignar para estos parámetros son definidos en el MHC. Se recomienda ingresar al modelo numérico valores medios dentro del rango de variación del parámetro, de forma que permita tener una holgura en la fase de calibración.

#### 7.4.8 Puntos de observación y datos registrados

Los datos observados y registrados en campo para el modelo hidrogeológico numérico corresponden a los niveles piezométricos y a la superficie piezométrica generada a partir de ellos en un tiempo específico. Los niveles piezométricos son parte fundamental del modelo numérico, ya que permiten evaluar el ajuste del modelo en el proceso de calibración y validación. A continuación, se presentan los criterios mínimos que deben ser considerados en relación con los pozos de observación:

- Estar ubicados dentro del dominio activo del modelo.
- Contar con un registro de datos representativo dentro del periodo de calibración del modelo.
- Conocer la cota de elevación del terreno con una precisión confiable y la cota de la boca del pozo.
- Conocer el diseño del pozo y la profundidad de lectura para que sea relacionada con la capa o ubicación que corresponda en el modelo.
- Presentar niveles de agua consistentes con la piezometría y comportamiento del acuífero.
- Se recomienda realizar un control de calidad a las series de datos a ingresar con el fin de depurar inconsistencias producto de errores instrumentales, errores en la lectura, en el registro de las mediciones u otras fuentes de error.

### 7.5 CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y/O ANALISIS DE SENSIBILIDAD

En las fases de calibración y validación se considera el ajuste que se debe realizar a los parámetros ingresados al modelo en busca de representar en una mejor medida las condiciones observadas e incrementando la confiabilidad del modelo en su capacidad predictiva, para que el desarrollo de simulaciones predictivas pueda realizarse con un nivel de incertidumbre bajo en relación con los resultados a obtener.


Datos necesarios para la calibración y validación del modelo:

- Los datos de calibración y validación deben ser independientes, siendo aconsejable que estén relacionados a diferentes condiciones hidrológicas.
- Cuando se cuenta con un periodo de registro de datos mayor a 10 años, se recomienda utilizar 70% de los datos observados en la calibración y el 30% restante en la validación.
- Cuando se cuente con un periodo de registro entre 5 y 10 años, se recomienda la misma distribución anterior de los datos, pero sujeto a establecer un plan de seguimiento y monitoreo de las variables ambientales, donde se incremente el número de pozos y la frecuencia de los monitoreos.
- Cuando la disponibilidad de registros sea inferior a 5 años, se recomienda utilizar los datos para el desarrollo de la calibración, prescindiendo de la validación. Sin embargo, se debe incluir un análisis de sensibilidad detallado que permita estimar la incertidumbre de las predicciones, además de incluir un plan de seguimiento y monitoreo de las variables ambientales con un mayor número de pozos y frecuencias de monitoreo.

#### 7.5.1 Calibración

La calibración se considera como una variación sistemática de algunos parámetros del modelo con el objetivo de reproducir el comportamiento de los de los niveles piezométricos observados en campo (modelos de flujo). Para esto es de gran relevancia la selección de los parámetros a calibrar, la cual se debe enfocar en una mínima cantidad, con énfasis en los que presentan mayor incertidumbre y sensibilidad. El rango de variación que se asigna a cada parámetro en esta fase deberá enmarcarse en los límites establecidos en el modelo conceptual. Generalmente en los modelos de flujo se consideran los siguientes parámetros:

- Conductividad hidráulica: Debe conservarse dentro de los rangos determinados en el modelo conceptual. Los valores iniciales pueden ser tomados de pruebas hidráulicas o de información secundaria, en caso de no contar con las primeras.

 <p><b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b></p>	<p><b>GUÍA</b></p> <p><b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRANEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b></p>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

- Porosidad y coeficiente de almacenamiento específico: dado que las pruebas de bombeo generan valores de corta duración para estos parámetros, se recomienda utilizar rangos de valores definidos en la literatura para el tipo de formación y material definido en el estudio geológico.
- Distribución de las tasas de recarga y caudales de recarga lateral: La definición y estimación de la distribución y magnitud son estimados en el modelo conceptual, por lo que se debe analizar y justificar su modificación.
- Parámetros que rigen el funcionamiento de las condiciones de frontera: dado que las condiciones de frontera se definen en el modelo conceptual, se debe ser cuidadoso en las modificaciones que se realicen y estas deben estar ampliamente justificadas.

#### 7.5.1.1 Metodología para la calibración

La calibración puede realizarse de forma manual o automática, su selección dependerá de la complejidad del modelo, y del criterio y experiencia del modelador, esta puede realizarse en régimen estacionario o transitorio, siendo más sencillo en el primero dado que solo se requiere reproducir un conjunto único y fijo de variables objetivo, usualmente se realiza este tipo de calibración para establecer condiciones anteriores a la implementación de los proyectos o cuando existe carencia de registros. Por otro lado, el régimen transitorio requiere más información y series de tiempo que concuerden con los periodos e intervalos de simulación. Se recomienda utilizar series de tiempo que abarquen diferentes condiciones hidrológicas de la zona (periodos secos y húmedos) o periodos de tiempo que abarquen actividades desarrolladas en la zona (bombeo de pozos, inyección de fluidos, regulación de ríos, etc.), ya que esto permite evaluar la respuesta del modelo ante los diferentes fenómenos hidrológicos o antrópicos que se pueden presentar. Es de resaltar que para la realización de simulaciones en régimen transitorio la calibración a realizarse debe de estar en este mismo régimen.

La calibración se considera exitosa cuando al realizar una evaluación cuantitativa de los resultados que puede realizarse a través de diferentes estadísticos o funciones objetivo como el error medio absoluto (MAE) y/o el error medio cuadrático (RMSE) se obtienen resultados aceptables. Algunos autores consideran que un RMSE inferior al 10% para una escala regional es aceptable (Nevada Division of Environmental Protection, 2018). De forma complementaria, un MAE de uno o dos órdenes de magnitud menor a la precisión requerida para los resultados puede ser considerada como el error deseable (por ejemplo, errores del orden de centímetros corresponderían a una bondad de ajuste adecuada para representar diferencias de nivel del nivel freático del orden de metros). Por otro lado, la evaluación cuantitativa debe considerar un análisis de la consistencia de los mapas de direcciones de flujo y perfiles, en relación con lo identificado en el modelo conceptual, siendo de gran importancia ya que esto indica que el modelo está representando de forma adecuada lo que sucede en el medio que se quiere simular.

#### 7.5.1.2 Balance de masa

El balance de masa del modelo hidrogeológico numérico permite establecer las relaciones entre las entradas (Diferentes condiciones de frontera, recarga, inyecciones, etc.) y salidas del sistema (Diferentes condiciones de frontera, cuerpos hídricos superficiales, extracciones en pozos y/o aljibes, manantiales, etc.). El balance de masa se puede presentar en volumen [L3]o como un flujo [L/T]se evalúa en cada paso de tiempo, y en cada uno de estos el resultado debe ser inferior al 1% y debe ser analizado en relación con los resultados obtenidos en el modelo conceptual. Es importante recalcar, que este criterio es de obligatorio cumplimiento para que el modelo sea confiable.

#### 7.5.2 Validación

La validación contempla las mismas consideraciones que la calibración, solo que para su desarrollo se utiliza un conjunto de datos independientes a los utilizados en la fase anterior, preferiblemente estos deben de contemplar una condición hidrológica diferente, de forma que el modelo logre representar de forma adecuada los valores observados. En esta fase puede realizarse ajustes pequeños en los valores de los parámetros, asegurándose que el modelo permanezca calibrado; si los cambios son mayores, esto se considera como una nueva calibración, por lo que se requiere utilizar una serie adicional de datos para validar el modelo a partir de los valores asignados a los parámetros.


#### 7.5.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad contempla la variación que se obtiene en los resultados del modelo con la variación de uno de sus parámetros. En modelos hidrogeológicos usualmente son utilizados parámetros como conductividad hidráulica, porosidad, cabeza específica o algunas variables de entrada como caudales y tasas de recarga de los acuíferos, algunas de ellas son difíciles de cuantificar en campo por lo que presentan un alto nivel de incertidumbre.

El análisis de sensibilidad es utilizado para definir los parámetros con mayor incidencia en la modelación, así como los que no presentan incidencia, ayudando a la selección de parámetros para la calibración; por otro lado, posterior a la calibración, sus resultados pueden ser utilizados para para analizar los efectos de los cambios en los parámetros y asociándolos a rangos de confianza de los resultados de las simulaciones. De igual forma, tal como se mencionó anteriormente juega un papel relevante en el análisis de la certidumbre del modelo cuando se tienen datos de registro de nivel inferiores a 5 años.

#### 7.6 ESCENARIOS DE MODELACION

Luego de una correcta calibración y validación del modelo, este contará con la capacidad de predecir el comportamiento del medio ante la ocurrencia de diferentes sucesos naturales o antrópicos, que sean de interés y relacionados con las actividades económicas o proyectos que se desarrollan en la zona, por lo que se deberán plantear escenarios de modelación según la etapa del licenciamiento ambiental en la que se encuentre el proyecto.

 <p><b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b></p>	<p><b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b></p>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

### 7.6.1 Evaluación

Para los MHN que sean desarrollados dentro de una solicitud de licencia ambiental se recomienda considerar escenarios que contemplen el comportamiento del dominio de modelación ante diferentes condiciones: sin proyecto, con proyecto, con proyecto y con la implementación de medidas de manejo consideradas para este, ante la ocurrencia de una posible contingencia que pueda afectar el recurso y bajo escenarios de variabilidad climática.

El modelador debe seleccionar escenarios de simulación con base en la naturaleza del POA, que permitan identificar los posibles impactos que las actividades a desarrollar (bombeo, inyección, excavaciones, concesiones de agua subterránea, etc.) pueden generar en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico subterráneo, considerando de igual forma que se trata de un ambiente cambiante con fenómenos de variabilidad climática cada vez más marcados que deben ser contemplados en el marco de las diferentes fases del proyecto.

Actualmente, se encuentran disponibles series de conjuntos de datos sobre escenarios climáticos a disposición de los usuarios, como las predicciones del NARcliM o de NASA NEX-GDDP, entre otros; que han sido adaptados a Colombia por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y pueden ser descargados de la página web de esa entidad. Estos conjuntos de datos pueden tenerse en cuenta para los Grandes Proyectos que tengan una vida útil de más de 20 años o que estén situados en zonas donde se prevean cambios considerables en el ciclo hidrológico (precipitaciones, escorrentía). En su caso, los conjuntos de datos de predicción del cambio climático pueden utilizarse para la modelación de escenarios con el fin de determinar el impacto del cambio climático en las actividades, incluido el impacto acumulativo. En algunos casos, los cambios climáticos previstos pueden reducir el impacto de una actividad en los recursos de aguas subterráneas (DPE, 2022).

### 7.6.2 Seguimiento

Para los MHN que sean desarrollados durante el seguimiento a la licencia ambiental, los escenarios simulados deben contemplar las fases actuales y futuras del proyecto, donde a través de los datos colectados mediante las actividades de seguimiento y monitoreo se logre identificar si las medidas implementadas para el manejo de las actividades o permisos de uso y aprovechamiento de los recursos naturales (bombeo, inyección, excavaciones, concesiones de agua subterránea, etc.) están siendo efectivas o si por el contrario se requiere que estén sean complementadas o adaptadas a las condiciones actuales del proyecto.

Como parte de las actividades de control y seguimiento que se realizan a los proyectos, es esencial que se comparen las predicciones a corto plazo del modelo con las condiciones de campo iniciales, estas comparaciones podrían incluir cabezas y flujos hidráulicos, tasas de desagüe y consideraciones geoquímicas. Al evaluar el rendimiento del modelo predictivo frente a las observaciones durante el período de tiempo intermedio se obtendrá información adicional sobre el sistema de flujo de agua subterránea, lo que ayudará a refinar los modelos conceptuales y numéricos para futuras actualizaciones. Por lo tanto, es esencial que todos los modelos incluyan predicciones tanto a corto como a largo plazo (Nevada Division of Environmental Protection, 2018).

## 7.7 ANALISIS DE RESULTADOS Y VIABILIDAD AMBIENTAL

El principal resultado del MHN de flujo es el comportamiento de la carga hidráulica o piezometría. Esta debe ser coherente con el sistema de flujo definido en el MHC, es decir, confirmar las zonas de recarga y descarga, y en caso de estar simulando actividades solicitadas o aprobadas en la licencia ambiental (concesiones de aguas subterráneas, túneles, depósitos de relaves, botaderos, rellenos sanitarios, tajos, entre otros), se debe analizar el abatimiento causado por la ejecución de los proyectos.

En caso de proyectos que incluyan la actividad de inyección, la variable a analizar es la presión, cuyo aumento no debe superar la presión de fractura del yacimiento. Para los impactos en cuerpos hídricos superficiales, según las condiciones de frontera impuesta para su representación en el modelo se evalúa la descarga (flujo base) o recarga, y así mismo, plantear medidas de manejo.

Otro análisis muy común que puede ser incluido es el seguimiento de partículas (particle tracking), las cuales pueden ser lanzadas hacia delante o hacia atrás. Permiten evaluar las direcciones preferenciales de flujo en sitios importantes de consideración ambiental, identificando posibles fugas, trasvases, vertimientos, etc.

## 7.8 PRESENTACION DE LA INFORMACION

Es esencial que el reporte de modelación sea transparente, preciso e incluya todos los componentes necesarios para ser revisado, debe describir la base del modelo, los supuestos clave, el enfoque de la modelación, las limitaciones, los resultados, conclusiones y recomendaciones del estudio. Los archivos de la modelación deben incluir los análisis de datos documentados, los datos de modelación y los archivos del software o código utilizado. Es importante que el archivo del modelo se lleve a cabo de tal manera que el modelo pueda ser reproducido si es necesario para su revisión y/o perfeccionamiento.

Por otro lado, los datos deben almacenarse acorde a la estructura definida en el Modelo de Almacenamiento Geográfico de esta Autoridad Ambiental, diseñada para la presentación de modelos numéricos del recurso hídrico subterráneo, a partir del momento en que este sea acogido a través de acto administrativo.

### 7.8.1 Documento o reporte de modelación

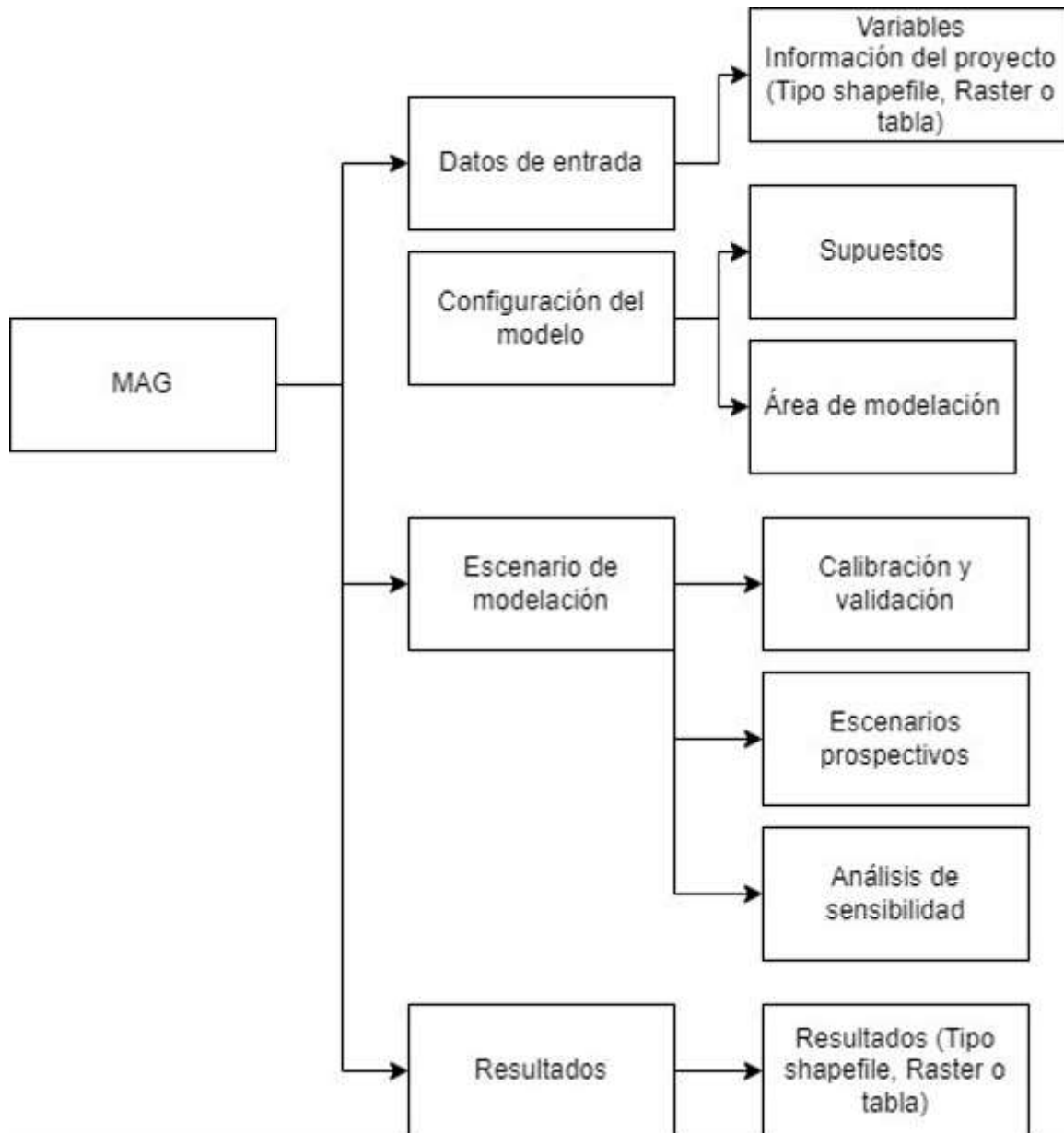
El informe de modelación de las aguas subterráneas pueden ser un documento independiente que se incluya en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) presentado por los usuarios en el momento de la solicitud de la licencia ambiental o de su modificación, así como hacer parte de los documentos incluidos en los Informes de Cumplimiento Ambiental. El nivel adecuado de documentación variará en función del alcance de los objetivos del estudio, la fase del proyecto y la complejidad de las simulaciones del modelo. El contenido mínimo que debe contener el reporte de modelación se presenta en el Anexo 1.

**7.8.2 Archivos del modelo (Ejecutables)**

Una vez finalizado el estudio, hay que organizar los archivos ejecutables o de resultados del modelo, los datos, la información y los conocimientos acumulados a lo largo del proceso de modelación. El objetivo del archivo es garantizar que los resultados presentados en el informe del modelo sean reproducibles en el futuro, ya sea por el desarrollador del modelo o por otras partes interesadas. El archivo del modelo sirve como depósito para facilitar el análisis y el perfeccionamiento futuro del modelo de aguas subterráneas.

**7.8.3 Modelo de Almacenamiento Geográfico (MAG)**

Figura 7-5. Diagrama de flujo del MAG



Fuente: ANLA, 2023.



 <p><b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b></p>	<p><b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS</b> <b>SUBTERRANEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS</b> <b>NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b></p>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

Tabla 7-2. Descripción del contenido del MAG

Nombre capa geográfica	Descripción	Ejemplo
AreaModelacion	Espacio modelado, corresponde al dominio computacional del modelo	Área donde se desarrollan los procesos que se quieren analizar, limitada en los laterales por condiciones de frontera como sistemas estructurales, cuerpos de agua superficiales, cuencas hidrográficas, unidades hidrogeológicas, etc. En profundidad, el área puede corresponder a la capa de una formación de baja permeabilidad.
VARIABLESPARAMETRO	Variables de entrada, parámetros y condiciones de frontera.	Se cuenta con variables en capa tipo punto, línea y polígono. <ul style="list-style-type: none"> <li>• PT: Puntos de observación, pozos de bombeo, piezómetros, etc.</li> <li>• LN: Fallas, cuerpos de agua superficiales, etc.</li> <li>• PG: Unidades geológicas, distribución espacial de la recarga, propiedades hidráulicas, etc.</li> </ul>
Resultados	Resultados cualitativos y cuantitativos de las salidas de un modelo distribuidos puntualmente.	Se cuenta con resultados en capa tipo punto, línea y polígono. <ul style="list-style-type: none"> <li>• LN: Isopiezas de direcciones de flujo, cambios de presión, etc.</li> <li>• PG: Recarga, nivel piezométrico, distribución de un contaminante en el tiempo.</li> </ul>

Nombre de la tabla	Descripción	Ejemplo
Modelo	Características generales y tipología del modelo ambiental.	Modelo distribuido en 3D, desarrollado en Feflow 8.1, con el que se busca simular el comportamiento del flujo en un proyecto de minería a cielo abierto.
ConfiguraModel	Detalla las diferentes configuraciones que se pueden dar para parametrizar la corrida de un Modelo ambiental.	Un modelo de flujo transitorio, desarrollado en Feflow ya aplicando la ley de Darcy, resuelta a través de PCG (Preconditioned conjugate-gradient method). La malla es no estructurada de prismas triangulares.
Escenario	Indica las diferentes representaciones de una situación abstracta de la realidad que se pretende modelar.	Esc1: Escenario que representa las condiciones sin proyecto, donde se buscan representar las condiciones actuales del flujo subterráneo en el área de modelación. Para este escenario se contempló un periodo de calentamiento de un año, correspondiente a un año hidrológico, iniciando el 01.01.2016 y terminando e 31.12.2016. El periodo de análisis del modelo inicia el 01.01.2017 y finaliza en 31.12.2023, con pasos de tiempo constantes de un día, que permite la visualización de los resultados en días. Esc2: Escenario donde se busca representar las condiciones con proyecto, en él se representa el avance minero en un periodo de operación de 20 años, simulando los cambios en la profundidad del nivel freático como resultado de la operación. La simulación inicia en 01.01.2024 y finaliza el 31.12.2044, con pasos de tiempo constantes de un día.
Supuestos	Detalla las certezas asumidas asociadas a una configuración de un ejercicio de modelación.	Para la construcción del modelo se supone una recarga potencial equivalente el 10% de la precipitación media anual, debido a las características de los suelos, la vegetación y la topografía del terreno.

 <b>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</b>	<b>GUÍA</b> <b>EXTERNA DE BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO DE MONITOREO DE LOS RECURSOS NATURALES DE LA ANLA PARA ACTORES EXTERNOS</b>	Fecha	12-05-2026
		Versión	1
		Código	IR-GU-12

Nombre de la tabla	Descripción	Ejemplo
VariablesParametros	Listado detallado de las variables de entrada, parámetros y condiciones de frontera empleados en un modelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductividad hidráulica.</li> <li>• Transmisividad.</li> <li>• Almacenamiento específico.</li> <li>• Porosidad.</li> <li>• Nivel freático.</li> <li>• Carga hidráulica.</li> <li>• Caudal de bombeo.</li> <li>• Conductancia.</li> </ul>
RegVariabParam	Descripción y relación de las variables de entrada, parámetros y condiciones de frontera.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductividad hidráulica: Valores de conductividad asignados a las diferentes unidades geológicas.</li> <li>• Nivel freático: Registros de niveles freáticos en puntos de observación, en un periodo de tiempo establecido.</li> <li>• Caudal de bombeo: Valores de caudales extraídos en los pozos de bombeo.</li> </ul>
Resultados	Listado detallado de los resultados cualitativos y cuantitativos de la salida del modelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficie piezométrica, metros, distribuidos.</li> <li>• Nivel freático, metros, agregado.</li> </ul>
RegistroResultados	Registros de los resultados cualitativos y cuantitativos de las salidas de un modelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel freático: Valores de niveles diarios en los puntos de observación entre los años 2024 y 2044. Dato vectorial, valor numérico.</li> </ul>

Fuente: ANLA, 2023.

#### 7.8.4 Ubicación de la información

La ruta donde se debe alojar esta información deberá ser en los anexos del capítulo de uso y aprovechamiento de los recursos naturales así: Capitulo\_usos\_y\_aprovechamiento Recurso\_Hídrico\_Subterráneo Modelación\_Hidrogeologica. En esta ubicación deben localizarse las siguientes carpetas:

- A. Carpeta Anexos
  1. Documento o reporte de modelación
  2. Ejecutables del modelo (Modelo calibración, modelo validación, modelo escenarios)
  3. Modelo de almacenamiento geográfico - MAG

#### 8. Referencias

- **Waveren, R. v., Groot, S., Scholten, H., Geer, F. v., Wösten, J., Koeze, R., & Noort, J.** ,Good Modelling Practice Handbook. Dutch Dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment. (1999)
- **Middlemis, H.** ,Groundwater Flow Modelling Guideline. Aquaterra Consulting Pty Ltd. (2000)
- **Reilly, T. E., & Harbaugh, A.W.** ,Guidelines for evaluating ground-water flow models. US Department of the Interior, US Geological Survey. (2004)
- **Crout, N., Kokkonen, T., Jakeman, A., Norton, J., Newham, L., Anderson, R., Croke, B.** ,Modelling Practice Good. (2008)
- **Barnett, B., Townley, L., Post, V., Evans, R., Hunt, R., Peeters, L., Werner.** ,Australian groundwater modelling guidelines. Canberra: Waterlines Report Series. (2012)
- **Servicio de Evaluacion Ambiental**,Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental, SEA. (2012)
- **MADS, S. M.**,Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de Acuíferos. Bogotá. (2014)
- **Nevada Division of Environmental Protection.** ,Guidance for Hydrogeologic Groundwater Flow Modeling at Mine Sites. Bureau of Mining Regulation and Reclamation. (2018)
- **DPE.**,Minimum groundwater modelling requirements for Major Projects in NSW. (2022)
- **Instituto de Hidrologia, M. y.-I.**,IDEAM. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica> (2023)

<b>Elaborado por:</b>	<b>Revisado por:</b>	<b>Aprobado por:</b>
Nombre	Nombre	Nombre
Luisa Fernanda Valencia Casas Didier Felipe Barragan Rojas	Oscar Alexander Varila Quiroga	Jorge Alberto Sanabria Morales
Cargo	Cargo	Cargo
Profesional Técnico Profesional de Calidad	Profesional Especializado	Coordinador
Fecha	Fecha	Fecha
29-04-2026	04-05-2026	12-05-2026