



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

SIMSAFADIM-CLASTIC: Modelización 3D de transporte y sedimentación clástica subacuática

Òscar Gratacós Torrà



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – Compartirlqual 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – Compartirlqual 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0. Spain License.**

Capítulo 2

Conceptos previos y antecedentes

2.1 [***Introducción***](#)

2.2 [***Conceptos previos***](#)

2.3 [***Metodología de trabajo***](#)

2.4 [***Tipos de modelo***](#)

2.4.1 Modelos descriptivos (*Descriptive models*)

2.4.2 Modelos basados en la estructura (*Structure-imitating*)

2.4.3 Modelos basados en procesos (*Process-imitating*)

2.4.4 Modelos inversos (*Inverse models*)

2.4.5 Modelos híbridos

2.5 [***Antecedentes***](#)

2.1 Introducción

En este capítulo se revisa la literatura existente sobre la modelización de procesos sedimentarios. Previamente, se introducen de manera breve una serie de conceptos básicos y generales sobre los modelos y la modelización y se comentan los diferentes tipos de modelos sedimentarios generados hasta la actualidad.

Durante las dos últimas décadas, los avances en el campo de la modelización sedimentológica se han centrado en observar, describir e interpretar el registro estratigráfico. Pero son los avances producidos en la cuantificación de los procesos geológicos, mediante la aplicación de la informática al desarrollo de cálculos numéricos, los que han dotado al mundo científico de la herramienta necesaria para desarrollar modelos numéricos de sedimentación más sofisticados y completos.

Actualmente, los modelos de sedimentación numéricos se centran en la comprobación de las hipótesis extraídas de ejemplos naturales. Entre ellos, los modelos de avance (*forward models*) permiten analizar una evolución temporal que en la realidad es difícil de observar (ya que en ésta sólo se observa una situación temporal puntual). Consecuentemente, son modelos con un grado de libertad suficientemente grande para entender la interrelación de las diferentes variables consideradas y su influencia en los resultados obtenidos.

[↶ Arriba](#)

2.2 Conceptos previos

Para facilitar la lectura de la presente tesis, a continuación se introducen y definen una serie de conceptos básicos utilizados en el campo de la modelización geológica.

En primer lugar, hay que definir el propio concepto de **modelo**. La palabra **modelo** puede tener varios significados entre la comunidad científica y, a veces, puede resultar difícil saber a cual se está refiriendo (Anderson y Bates, 2001). Según la Real Academia de la Lengua Española, un **modelo** es un “*esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja*”. Esta definición, aunque aceptable, incide preferentemente en un tipo de modelo donde las ideas o hipótesis vienen expresadas en forma matemática.

En este sentido, de forma más general Konikow y Bredehoeft (1992) definen **modelo** como “*una representación de un sistema real o proceso*” y Koltermann y Gorelick (1996) como “*una representación simplificada de la realidad expresada mediante un grupo de suposiciones que la simplifican*”. Como puede observarse en estas definiciones, cualquier modelo viene determinado por el tipo de representación utilizada.

Clarificado el concepto de modelo, la siguiente pregunta planteable es: ¿Qué se considera como **modelo geológico**? Aunque existen diferentes opiniones en la comunidad científica, puede considerarse que un modelo geológico es “***una representación limitada de un sistema o proceso geológico observado en la realidad***”. Esta definición, si bien es sencilla, incluye una serie de términos que implican unas consideraciones básicas para matizar y completar el concepto introducido:

- “***...representación limitada...***”. Esto significa que un modelo no es la realidad sino que es una abstracción de la misma. El método de representación estará en función de los parámetros utilizados y extraídos de la realidad.
- “***...representación limitada...***”. El hecho de ser limitada, implica que un modelo sólo incluye algunas partes de la realidad, centrándose en los

parámetros considerados más relevantes, necesarios para la realización del modelo (o en los parámetros que pueden ser extraídos de la realidad). En este sentido, un buen modelo incorpora sólo los parámetros y la complejidad necesaria para describir la dinámica del sistema a investigar. Por este motivo la estructura óptima del modelo será dependiente del uso del mismo (escala de trabajo, escala temporal, variables, etc).

- “...un sistema o proceso geológico **observado**...”. La capacidad de observar el registro geológico es, obviamente, limitada. Por otra parte, cuando se realiza una observación, se observa a menudo el resultado final de la interacción de unos procesos, que pueden no seguir activos y de los cuales puede ser difícil reconocer y caracterizar las variables que los han controlado. De esta manera, no se puede realizar un modelo que se pueda considerar como “real”. Aunque parezca una obviedad, a medida que el conocimiento del mundo real aumenta, también mejoran los modelos que intentan reproducirlo, y éstos a su vez tienden a favorecer su comprensión y estudio, consiguiendo así un proceso de enriquecimiento mutuo.
- “...observado en la **realidad**”. La finalidad del modelo será representar el mundo (físico) real y no reconstrucciones no-reales o metafísicas del mismo.

A partir de estas consideraciones y su definición, pueden considerarse las siguientes fases básicas en el proceso de la modelización geológica que definen diferentes tipos de modelos geológicos (Konikow y Bredehoeft, 1992; Maloszewski y Zuber, 1992; Oral y Kettani, 1993; Kleijnen, 1995, Watney *et al.*, 1999): **modelo conceptual** o **analógico** es una hipótesis o descripción cualitativa, verbal o gráfica de cómo funciona u opera un sistema o proceso geológico y su representación (geometría, parámetros, condiciones iniciales y de contorno). Esta hipótesis puede ser expresada cuantitativamente a través de un modelo numérico o matemático. Los **modelos matemáticos** son abstracciones que representan procesos empleando ecuaciones, propiedades físicas mediante constantes o coeficientes en las ecuaciones, y medidas de estado o potencial en el sistema utilizando variables. Su función es la de entender y/o predecir el comportamiento de un sistema bajo unas condiciones específicas. Este modelo matemático puede ser implementado mediante un código informático dando lugar a un **modelo informático**.

Una vez clarificado el concepto de modelo geológico, se considera necesario definir otros conceptos utilizados en el campo de la modelización. Estas definiciones se han extraído del diccionario de la Real Academia de la Lengua Española y de la búsqueda a través de la página <http://www.scirus.com/srsapp/> y son las que se presentan a continuación :

- **Modelizar:** Acción de elaborar un modelo que represente o describa adecuadamente un fenómeno, un objeto o un proceso de la realidad. Esta acción no está incluida en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española y se ha definido a partir del vocablo en catalán *modelitzar* y del inglés *modeling*.
- **Fenómeno:** Toda manifestación que se hace presente a la conciencia de un sujeto y aparece como objeto de su percepción.
- **Proceso:** Actividad física que se produce en un sistema, como por ejemplo una corriente de turbidez (Perlmutter *et al.*, 1999).
- **Parámetro:** Elemento que aparece en una expresión matemática y que representa una condición o un proceso en un modelo (Perlmutter *et al.*, 1999).
- **Variable:** Número sin un valor fijo que representa una condición o proceso observado en la naturaleza, como puede ser el nivel del mar (Perlmutter *et al.*, 1999).
- **Simulación:** Proceso de solucionar un modelo matemático, como por ejemplo el que reproduce el flujo del fluido y el transporte, mediante unas condiciones iniciales y de contorno apropiadas (Koltermann y Gorelick, 1996). De la misma forma que sucede con el término *modelo*, existen más definiciones para el término simulación. Así, Venikov (1969) define la simulación como “... *un grupo de modelos... con una determinada similitud al primer sistema o modelo (el original)*”.

- **Calibración:** Acción de adecuar o ajustar los parámetros introducidos en un experimento a una situación observada en la realidad (Oreskes *et al.*, 1994; Konikow y Bredehoeft, 1992; Maloszewski y Zuber, 1992). Generalmente, la calibración es técnicamente válida para un escenario o valores particulares.
- **Evaluación:** Comparación de los resultados obtenidos con el mundo real, ya sea desde el laboratorio o el campo. Una correcta evaluación es necesaria para cualquier validación. A veces, la consecución de una serie de evaluaciones correctas es denominado *confirmación*.
- **Validación:** Determinación de si el modelo utilizado es una representación precisa del sistema bajo estudio (Kleijnen, 1995). El resultado de una validación no puede ser un modelo perfecto, ya que, por definición, cualquier modelo es una simplificación de la realidad. Por este motivo, el término *validar* no está totalmente aceptado por la comunidad científica (Bredehoeft y Konikow, 1993), ya que la declaración de “válido” que se puede asignar a un modelo puede transmitir al público en general, un grado implícito de corrección que puede no ser creíble, o que el propio modelo nunca podrá llegar a tener.
- **Verificación:** Determinar si el modelo informático es una representación fiable del modelo matemático, y si el modelo matemático lo es del modelo conceptual. Esta acción contribuye a la validación del modelo. Una buena verificación requiere que las predicciones extraídas sean comparadas con valores independientes de los usados para su realización (Kleijnen, 1995).
- **Discretizar:** Acción de dividir una zona u objeto de estudio en áreas o volúmenes representativos para la posterior solución de las ecuaciones matemáticas.
- **No-linealidad:** Se denomina sistema no-lineal (Maron y López, 1991) en x , y y z a aquél cuyo comportamiento no puede describirse mediante ecuaciones de primer orden del tipo:

$$ax+by+cz= \text{const.}$$

Para finalizar, cabe decir que cualquier modelo genérico no está exento de dar lugar a una serie de errores numéricos significativos cuando se aplican a ejemplos reales. Por este motivo, si el usuario de un modelo no conoce o ignora (por desconocimiento o por no ser facilitados) los detalles del método numérico utilizado, la escala temporal y espacial sobre la que trabaja, y las técnicas de solución numéricas utilizadas, pueden introducirse errores significativos y, lo que es más importante, éstos permanecerán indetectables. Por este motivo, un buen modelo no puede o no debería ser lo que se denomina coloquialmente como una “caja negra”.

[↶ Arriba](#)

[Índice ↴](#)

[↶ Arriba](#)

2.3 Metodología de trabajo

El procedimiento metodológico seguido durante el periodo de investigación resumido en la presente tesis para la elaboración de un modelo geológico incluye tres fases principales que coinciden con las etapas básicas en el proceso de modelización (figura 2.1). Estas etapas son:

Fase inicial

- a.** Conocimiento del estado actual de investigación en el campo de la modelización de cuerpos sedimentarios. Análisis del sistema a estudiar mediante trabajo de campo y bibliográfico. Definir exactamente el objetivo del modelo a realizar (por qué y para qué se quiere el modelo). Establecer el grado de precisión del mismo, la dimensión de trabajo y la escala temporal sobre la que trabaja.

Fase de construcción y desarrollo

- b.** Construcción del modelo conceptual en el cual se identifican las principales variables y procesos involucrados (*fase inductiva*). Se definen los procesos que van a ser conceptualizados y se cuantifican las relaciones entre ellos definiendo las variables y parámetros que intervienen e interactúan en el sistema. Se enumeran e identifican las limitaciones básicas que contiene el modelo.
- c.** Construcción del modelo matemático definiendo las ecuaciones a partir del modelo conceptual establecido en el apartado anterior.
- d.** Realización del modelo numérico informático, codificando e implementando en lenguaje informático los diferentes algoritmos del modelo matemático. Proceso de comprobación y verificación del código informático. Comparación de los resultados obtenidos con soluciones analíticas para identificar los errores y establecer los límites de aplicación y las limitaciones.
- e.** Proceso de verificación y calibración del programa y de los diferentes parámetros utilizados.

Fase final

- f. Aplicación del modelo a un ejemplo real en estudio, definiendo y cuantificando los parámetros del experimento que van a ser introducidos (*fase deductiva*).
- g. Análisis de las predicciones extraídas y comparación con las observaciones realizadas en el sistema bajo estudio (*fase de confirmación*).
- h. Redacción de las conclusiones finales

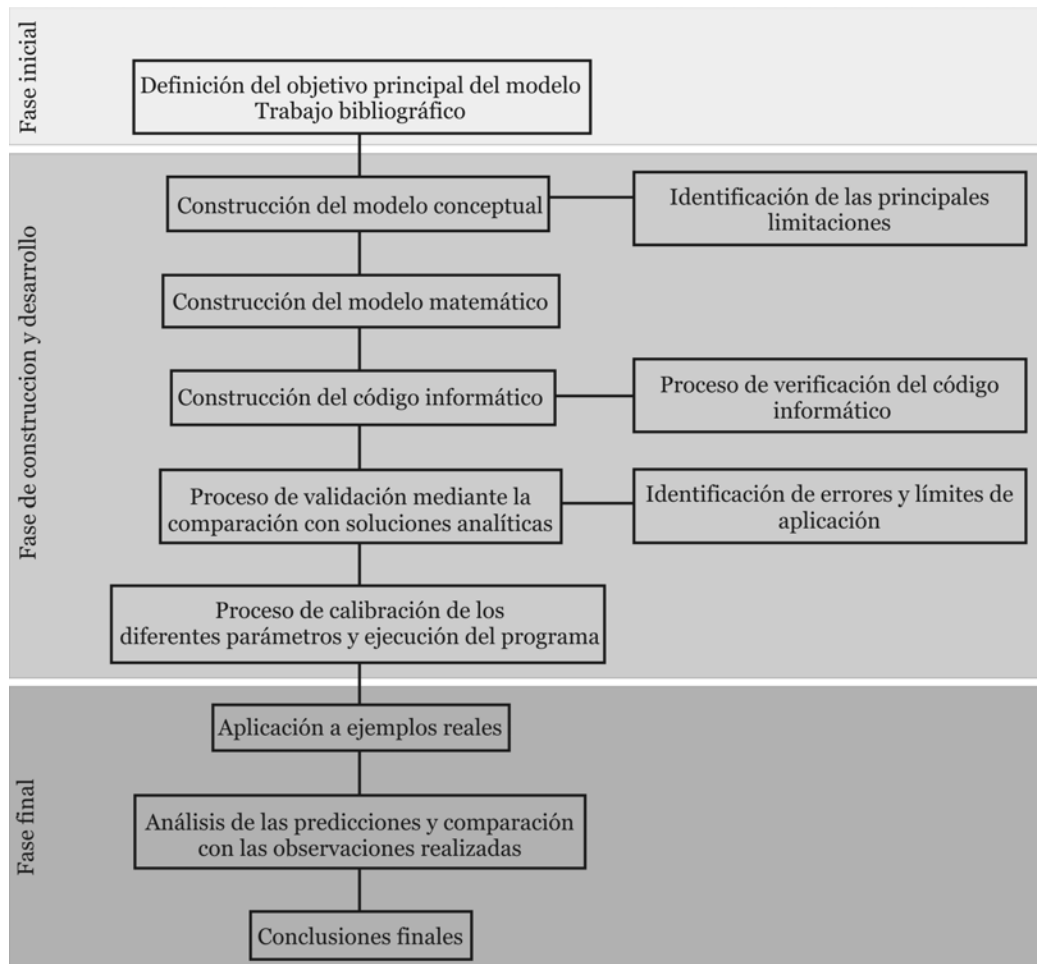


Figura 2.1.- Esquema del procedimiento metodológico seguido y resumido en la presente memoria.

Workflow of the work presented in this thesis memoir.

2.4 Tipos de modelos

A pesar de que en los últimos 50 años se han desarrollado un gran número de modelos sedimentológicos y estratigráficos, no existe un patrón común para todos ellos por lo que se refiere a su diseño, suposiciones utilizadas y aplicaciones. Consecuentemente no existe una clasificación precisa y/o única para todos. Los trabajos que han analizado la modelización sedimentológica han agrupado los modelos según diferentes clasificaciones en función de diferentes criterios (Harbaugh y Bonham-Carter, 1970; Schwarzacher, 1975; Syvitski, 1989; Tetzlaff y Harbaugh, 1989; Wendebourg y Harbaugh, 1996; Webb y Davis, 1998; Koltermann y Gorelick, 1996; Watney *et al.*, 1999; Paola, 2000).

Por ejemplo, Watney *et al.* (1999) clasifican de manera general los tipos de modelo en función de la dirección y del vehículo. En función de la dirección (figura 2.2), un modelo geológico puede ser de **avance** (examinan la interacción de procesos para producir una respuesta sedimentaria) o **inverso** (utilizan procedimientos numéricos para interpretar procesos sedimentarios y los parámetros relacionados a partir de un registro). De manera similar a la dirección, existen tres tipos de vehículos: las **analogías** o conceptualizaciones que parten de una interpretación geológica basada en una descripción cualitativa, verbal o gráfica de un sistema geológico; modelización **empírica** que incluye la recolección, procesado y visualización de la información, generalmente utilizando información cualitativa y cuantitativa; y las **simulaciones** informáticas que utilizan medidas cuantitativas, estimadas o inferidas, para construir representaciones cuantitativas de un sistema geológico.

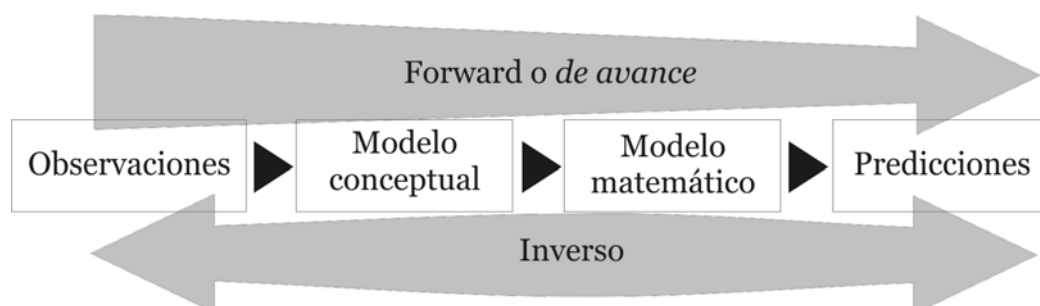


Figura 2.2.- Relaciones entre diversos tipos de modelos: conceptual, matemático, de avance e inversos. Modificada de Cross y Harbaugh (1990).

Relations among conceptual, mathematical, forward and inverse models. Modified from Cross and Harbaugh (1990).

Una clasificación más detallada y completa, aunque orientada específicamente hacia estudios de modelización de circulación de geofluidos en cuerpos sedimentarios, es la clasificación propuesta por Koltermann y Gorelick (1996). Esta clasificación se basa en la complejidad que existe en el momento de representar gráficamente la heterogeneidad espacial de las propiedades petrofísicas presente en el registro sedimentario de cualquier cuenca, y que se utiliza para un posterior tratamiento informático mediante modelos numéricos. Esta heterogeneidad, reflejada en cambios litológicos y de facies, está controlada por la distribución tridimensional de los cuerpos sedimentarios, que depende de los procesos geológicos que los generan. La heterogeneidad petrofísica del relleno de cualquier cuenca controla a su vez gran parte de los procesos activos en ellas como pueden ser los flujos de fluidos y, por tanto, la migración de hidrocarburos o la formación de mineralizaciones asociadas a circulación de fluidos. La imposibilidad de obtener la información tridimensional real de toda la heterogeneidad presente en los sistemas deposicionales, da lugar a que los modelos puedan ayudar a caracterizar su distribución tridimensional (ya sea infiriendo la información obtenida hacia las tres dimensiones, o intentando simularla mediante modelos numéricos).

La clasificación propuesta por Koltermann y Gorelick (1996) agrupa los diferentes modelos generados hasta la actualidad en cinco categorías generales que a continuación se describen brevemente, para así comprender las diferentes vías y métodos emprendidos en el campo de la modelización hasta la actualidad. Para dotar al lector de un campo de visión más amplio y completo, en cada una de estas categorías se citan los principales trabajos realizados anteriormente. No obstante, hay que decir que los modelos existentes son numerosos y, por este motivo, sólo se han citado algunos ejemplos de cada una.

2.4.1 Modelos descriptivos (Descriptive models)

Los modelos denominados descriptivos se caracterizan por combinar información puntual y regional de una zona con modelos sedimentarios conceptuales (estratigráfico-sedimentológicos) para producir, así, imágenes deterministas de la heterogeneidad presente. Son modelos en los que las facies geológicas definen la distribución espacial de las propiedades petrofísicas e hidráulicas que, a su vez, controlan el flujo de fluido y el transporte (Anderson, 1989; Fogg, 1986).

Los modelos descriptivos generan mapas zonales combinando mapas de facies (derivados de modelos geológicos conceptuales) con unidades hidroestratigráficas (definidas a partir de propiedades geológicas e hidráulicas). La definición de las zonas es uno de los principales problemas de este tipo de modelos ya que está siempre sujeta a la calidad y el detalle de la información geológica disponible y a la interpretación que se haga de ella.

Otra de las limitaciones es la representación a gran escala de la variación de la conductividad hidráulica ya que ésta produce la pérdida de heterogeneidades significativas dentro de las zonas definidas. En general, la dependencia espacial de los datos no siempre se ve representada, resultando en una imagen determinista de las propiedades hidráulicas.

2.4.2 Modelos basados en la estructura (Structure-imitating)

Los modelos basados en la estructura utilizan diferentes métodos para aproximar y forzar los patrones geométricos espaciales de los sedimentos y sus propiedades petrofísicas. Esto se consigue a través de correlaciones aleatorias, reglas probabilísticas o conceptos deterministas derivados de las diferentes relaciones de facies.

Este tipo de modelos puede subdividirse en dos grandes grupos:

- **Modelos estadísticos espaciales** o **modelos estocásticos**, son aquellos que utilizan procedimientos geoestadísticos para forzar aleatoriamente variaciones en las propiedades de los cuerpos sedimentarios en dos o tres dimensiones, buscando representar toda la gama de posibles distribuciones espaciales (Isaaks y Srivastava, 1989; Deutsch y Journel, 1992). Son métodos que asumen, de modo simplificado, que la mayor parte de las propiedades estadísticas de un cuerpo no cambian espacialmente. Los modelos de este tipo pueden subdividirse en **discretos** o **no-Gaussianos** y **continuos** o **Gaussianos**.

Los **discretos** buscan representar formas y patrones petrofísicos en cuerpos sedimentarios relativamente de gran escala (canales, lóbulos deltáicos, etc.). Generalmente utilizan reglas para determinar las formas, dimensiones y orientaciones de estos cuerpos sedimentarios. En cambio, los **continuos**

tienden a representar variaciones, generalmente continuas en 3D, de las propiedades petrofísicas a menor escala. Esta distribución continua puede dividirse en categorías para generar mapas visualmente más “geológicos”.

- **Modelos geométricos o basados en patrones sedimentarios:** éstos utilizan reglas derivadas de modelos deposicionales conceptuales para predecir la geometría y litología de los cuerpos sedimentarios. Como utilizan condiciones iniciales, condiciones de contorno y entrada de sedimento, sus resultados están fuertemente controlados por los parámetros utilizados en estas condiciones. Ejemplos de este tipo de modelos se pueden encontrar en Lawrence *et al.* (1990) o Paola (1988, 1990).

2.4.3 Modelos basados en procesos (Process-imitating)

Estos modelos parten de los diferentes procesos y operan de acuerdo con leyes físicas y relaciones empíricas que gobiernan el transporte, deposición y erosión de los sedimentos. Todos estos procesos se representan a través de ecuaciones que pueden ser resueltas numéricamente mediante algoritmos matemáticos. Su solución numérica expresa la respuesta de estos procesos a través del tiempo y del espacio, produciendo secuencias sedimentarias en las que sus propiedades pueden ser representadas a partir de variaciones espaciales de diferentes parámetros como el tamaño de grano y la litología (Bonham-Carter y Sutherland, 1968; Tetzlaff y Harbaugh, 1989; Bitzer y Pflug, 1990). Por consiguiente, son modelos que proporcionan una relación directa entre los ambientes deposicionales y los procesos que crean las secuencias sedimentarias.

Este tipo de modelos basados en procesos hidrodinámicos, consiguen representaciones más complejas y realistas que otros tipos ya que parten de la no-linealidad del transporte de sedimento. Sin embargo, presentan grandes limitaciones, ya que sus respuestas vienen controladas por condiciones ambientales que se introducen en función de la topografía inicial, tasas de flujo y sedimento aportado por ríos, acción de las olas, etc. Estas condiciones ambientales son difícilmente extraíbles directamente de testimonios continuos o datos sísmicos, y generalmente se estiman a partir de datos de ejemplos actuales, o indirectamente a partir de informaciones petrográficas, sedimentológicas, tectónicas o geoquímicas. Por este motivo, son un tipo de modelos en los cuales es difícil establecer con precisión los parámetros que controlan los procesos reales que han actuado, sobre todo si se tiene en cuenta que éstos pueden cambiar drásticamente en función de su localización geográfica. Como resultado, aunque estos

modelos puedan llegar a reproducir características deposicionales, éstas no son fiables a pequeña escala.

Los modelos basados en procesos, así como los modelos estocásticos tratados anteriormente, se conocen con el nombre de modelos de avance o ***forward models*** (figura 2.2), y se caracterizan por ser irreversibles. Esta irreversibilidad radica en la formulación explícitamente aleatoria y en la reconstrucción de los procesos geológicos a partir de una secuencia de pasos de tiempo definidos desde un punto inicial del pasado.

Uno de los puntos críticos en los modelos de avance reside precisamente en la definición de los intervalos de tiempo sobre los cuales avanza el programa numérico correspondiente. Por ejemplo, los procesos de transporte y sedimentación presentes en sistemas reales trabajan sobre escalas temporales diferentes en función del ambiente donde operan (continental o marino), del sistema (fluvial, lacustre, marino, etc.) o del tipo de sedimento que interviene (arcillas, arenas, conglomerados, etc.). De esta manera, pueden encontrarse, para un mismo proceso, escalas temporales de transporte muy pequeñas (segundos o minutos) en un canal fluvial, mientras que en medios marinos, estos tiempos de transporte pueden ser superiores, llegando a valores de días o incluso, meses. Además, estas escalas temporales pueden ser muy diferentes si se consideran procesos distintos en un mismo programa (por ejemplo transporte y sedimentación).

Esto provoca una dificultad importante en la correcta definición de los intervalos de tiempo en los que tiene que avanzar el programa si el modelo que se pretende realizar contempla ambientes, sistemas, procesos o sedimentos diferentes, llegando a generar incompatibilidades de cálculo entre ambientes o procesos dentro de un mismo programa. Como resultado es necesario muchas veces introducir simplificaciones que pueden hacer perder realismo a la simulación extraída hasta el punto de ser incorrecta o inservible en alguno o todos los aspectos.

2.4.4 Modelos inversos (*Inverse models*)

En contraposición (o complementando) a los modelos de avance, existen los modelos inversos o *inverse models* (figura 2.2). Estos modelos inversos, al contrario que los modelos de avance, parten de las observaciones actuales para estimar las condiciones iniciales y de contorno y las posibles combinaciones de variables proceso-respuesta que actúan a través del tiempo para producir las observaciones actuales realizadas. El método que utilizan para hallar la solución sigue un proceso complejo y riguroso en los diferentes pasos de tiempo. En cada paso de tiempo se comparan las predicciones con las observaciones para minimizar la diferencia existente entre ellos y

así ajustar progresivamente el modelo en cada iteración. Además, los modelos inversos pueden incorporar datos geológicos para forzar la solución y calcular los límites aceptables de la misma permitiendo de esta manera soluciones más aceptables cuando la respuesta no es única. Una revisión de los modelos inversos puede encontrarse en Lerche (1990).

2.4.5 Modelos híbridos

Todos los modelos enumerados anteriormente contienen restricciones, ya sea por su resolución o nivel de escala de trabajo, ya sea por el desconocimiento e incertidumbre de los factores geológicos a considerar, o por factores matemáticos inherentes a cada tipo de modelo. Por este motivo, las combinaciones entre los diferentes tipos de modelos pueden generar resultados más aproximados a la realidad objeto del modelo. De todos modos, esta metodología siempre estará ligada a los objetivos que se hayan establecido y a las propias limitaciones que pueden existir en el acoplamiento entre los diferentes modelos. Dentro de este grupo de modelos híbridos, se incluyen los trabajos de Tyler *et al.* (1994) que acopla métodos descriptivos con métodos estadísticos, y los de Cox *et al.* (1994) que combinan diferentes tipos de modelos basados en la estructura.

[↶ Arriba](#)

[Índice ↴](#)

2.5 Antecedentes

Hasta la actualidad se han diseñado diferentes modelos numéricos que intentan simular los procesos geológicos presentes en las cuencas sedimentarias.

El primer modelo dinámico utilizado en modelización estratigráfica es el de Culling (1960), el cual reconoce que es demasiado ambicioso simular la sedimentación a partir de los principios fundamentales que rigen los flujos de corriente por lo que propone usar un modelo de difusión.

Más tarde, Krumbein (1962) es el primero en discutir las aplicaciones de la informática en geología. A partir de estos trabajos, desde la segunda mitad de los años 60 se han desarrollado modelos de sedimentación basados en la simulación de procesos sedimentarios entre los que cabe destacar:

- Los modelos de sedimentación carbonatada basados en sistemas ecológicos de organismos productores de carbonato de Harbaugh (1966), Harbaugh y Wahlstedt (1967).
- Los modelos de sedimentación evaporítica de Briggs y Pollack (1967).
- Los modelos de deposición deltaica de Bonham-Carter y Sutherland (1968).
- Los modelos de sedimentación clástica en cuencas sedimentarias de Harbaugh y Bonham-Carter (1970) que, posiblemente, han sido los más utilizados en trabajos posteriores para generar modelos más avanzados y sofisticados.

Precisamente, Komar, en 1973, basándose en la filosofía y la técnica utilizada en este último trabajo, genera un modelo 2D basado en procesos y en el que relaciona la forma de un delta dominado por oleaje con el flujo de las olas y el aporte de sedimento.

A finales de la década de los 70, Allen (1978) y Bridge y Leeder (1979) desarrollan, independientemente, unos modelos que combinan las relaciones geométricas con funciones estocásticas para caracterizar la geometría de los cuerpos arenosos en sistemas aluviales. Sus trabajos predicen la nueva posición de un río por avulsión,

utilizando tablas de números aleatorios, y estableciendo de esta manera la conexión entre los cuerpos arenosos, un parámetro muy importante en el estudio de reservorios.

Durante los años 80 y principios de los 90, se inicia una nueva etapa para la modelización de cuencas sedimentarias y sistemas deposicionales. Se produce un salto cualitativo importante debido, sobre todo, al rápido avance en el campo de la informática y al creciente interés científico en cuantificar numérica y matemáticamente los procesos geológicos. Durante esta etapa se desarrollan numerosos modelos cuantitativos de sedimentación carbonatada, centrados, principalmente, en la modelización de secuencias carbonatadas cíclicas (Read *et al.* 1986; Goldhammer *et al.* 1987; Bosence y Waltham 1990; Bice 1991). Por ejemplo, en 1989, Strobel *et al.* presentan el modelo SEDPAK que genera geometrías sedimentarias a partir del relleno de una cuenca bidimensional por sedimento clástico o carbonatado. Este modelo utiliza leyes empíricas para aproximar los procesos e incorpora algoritmos estructurales para determinar la deformación de los sedimentos.

También muchas de las aproximaciones realizadas a mediados de los años 60 son codificadas en lenguaje informático durante esta etapa y posteriores, como es el caso de Bitzer y Harbaugh (1987) con el código DEPOSIM, un modelo 2D determinista y dinámico que representa de manera simple los principales procesos de transporte, sedimentación, erosión y compactación de sedimentos clásticos. Otras, se complementan con conceptos físicos más rigurosos, como en el modelo de Tetzlaff y Harbaugh (1989) llamado SEDSIM. Este código incluye erosión, transporte y sedimentación de materiales clásticos e incorpora procesos fluviales y la acción de las olas, que contribuyen a la acción erosiva. A partir de ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes, con cálculo de la velocidad de flujo y utilizando leyes empíricas para el transporte y deposición de sedimentos, en este modelo se obtienen facies muy realistas que reproducen las observadas en la realidad. Por lo tanto, SEDSIM y sus posteriores modificaciones (Martínez y Harbaugh, 1994), representan la mayor parte de los procesos geológicos que crean y modifican sistemas sedimentarios donde predominan los sedimentos clásticos.

En 1990, a partir de observaciones reales e incorporando conceptos teóricos de dispersión y difusión, Lawrence *et al.* (1990) presentan un simulador de relleno de cuenca que incorpora procesos tectónicos y sedimentarios y que se basa en el modelo de SHELL (Jervey, M; 1988). Aunque los detalles de los algoritmos utilizados no han sido facilitados, parece ser que utiliza conceptos relacionados con el espacio de acomodación (usando algoritmos semiempíricos que describen las características esenciales de los procesos físicos que controlan la deposición de sedimento) para obtener la geometría y los patrones de progradación de los diferentes cuerpos sedimentarios.

El mismo año, Bitzer y Pflug (1990), presentan un modelo tridimensional de sedimentación clástica y compensación isostática en cuencas sedimentarias llamado DEPO3D. En este programa se combina un modelo de flujo por potencial 2D estacionario con el transporte oceánico de sedimentos por suspensión, y se incorpora la subsidencia por carga de sedimento y la compactación. Este trabajo será el precursor de modelos posteriores (Bitzer y Salas, 2002). El primero de estos autores, más tarde (Bitzer, 1996) utiliza estos modelos de sedimentación para simular la evolución hidráulica en cuencas sedimentarias a escala de cuenca. Este tipo de simulación también es abordada por Person y Garven (1994) y más tarde por el propio Bitzer (1997 y 1999 con el programa BASIN) que incluyen el flujo de fluido por consolidación e incorporan el transporte de soluto y flujo de calor.

En el campo puramente sedimentológico, Flemings *et al.* (1996a, 1996b) prosiguen sus estudios anteriores (Flemings y Jordan, 1989) y generan el código STRATA. Este código, de uso libre, se centra en criterios estratigráficos para los cuales no se requiere una simulación de los procesos geológicos ni de los procesos sedimentarios como algunos de los modelos anteriores. Basándose en los trabajos de Kaufman *et al.* (1991) y Rivenaes (1992) que proponen utilizar la ecuación de difusión para aproximar el transporte de sedimento clástico, presentan un programa capaz de generar una distribución realista de facies siliciclásticas o carbonatadas a partir de leyes empíricas. En este sentido, es un modelo similar al de SHELL, propuesto por Lawrence *et al.* (1990).

En 1997, Wendebourg utiliza el código SEDSIM para crear un modelo digital de las facies sedimentarias presentes en un reservorio, sobre el cual se simulan flujos de fluido multifásicos.

En una línea diferente y actualizando otros programas de modelización detrítica básicamente 2D (Waltham, 1992; Hardy *et al.*, 1994; Whitaker *et al.*, 1997), en 1998, Hardy y Gawthorpe presentan un modelo numérico 3D de sedimentación clástica para estudiar las secuencias deposicionales desarrolladas en contextos de fallas normales. Este modelo incorpora subsidencia y cambios en el nivel del mar. Para el transporte de sedimento (un solo tipo de sedimento), utiliza un algoritmo de “paso-aleatorio” o *random-walk* para la zona continental, mientras que en la zona marina utiliza el método difusivo.

Complementando este modelo de Hardy y Gawthorpe (1998), Ritchie *et al.* (1999) desarrollan un nuevo modelo 3D de sedimentación detrítica que incorpora por primera vez la evolución de la red de drenaje en la zona continental.

En el mismo año, Haupt *et al.* (1999) crean, a partir de trabajos anteriores (Haupt *et al.*, 1994, 1995), un modelo 3D (SEDLOB) de transporte y circulación a escala oceánica (OGCM *Ocean General Circulation Model*) que acopla dos submodelos, uno para el transporte y otro para los procesos de sedimentación y erosión acaecidos en la capa más inferior del océano (ligado a la topografía). Con ello se consiguen patrones de distribución (acumulación y erosión de sedimentos) a escala oceánica para las diferentes partículas de sedimento transportadas.

También en 1999, Grangeon y Joseph (1999) del Instituto Francés del Petróleo (Ifp), conscientes de la importancia de la tridimensionalidad, presentan un modelo de avance estratigráfico 3D llamado Dionisos (Diffusive Oriented – Normal and Inverse – Simulation Of Sedimentation). Este programa utiliza leyes empíricas para simular el transporte de sedimento en 3D y las combina con la ecuación de continuidad para el sedimento (modelo difusivo). También tiene en cuenta una variación del coeficiente de difusión en función del tipo de sedimento, del ambiente (continental o marino) y la profundidad de agua. Los resultados que se extraen son realistas y centrados a escalas temporales largas y escalas espaciales grandes (distancias entre nudos mayores a 1 km e intervalos de tiempo superiores a 1000 años). En trabajos posteriores, este programa ha sido mejorado, aunque hasta el momento no existe ninguna publicación con los detalles de la solución numérica utilizada. Una aplicación de este programa y una breve descripción de los principios que utiliza pueden encontrarse en Euzen *et al.* (2004).

Ya en el año 2000 y siguiendo con la idea de Flemings *et al.* (1996a), Quiquerez *et al.* (2000) presentan el código DIBAFILL. Este código representa un modelo 3D de difusión para el transporte de dos tipos de sedimentos detríticos y es capaz de incorporar producción de carbonato *in situ*. No obstante, sólo contempla la variación en función de la profundidad de la producción de carbonatos para los dos organismos considerados, sin tener en cuenta ningún otro factor (como, por ejemplo, la evolución de las asociaciones de organismos productores de carbonato debido a los cambios ecológicos y ambientales o la influencia de la presencia de materiales clásticos).

En esta línea de trabajo, Bitzer y Salas (2001) presentan un modelo de sedimentación mixta carbonatada-clástica que se basa en modelos predador-presa, los cuales pueden ser interpretados en términos de evolución ecológica de organismos productores de carbonato. Es un modelo que también incorpora la relación entre diferentes tipos de materiales carbonatados y clásticos, con la introducción de un solo tipo de material clástico-carbonatado producido dentro del propio sistema.

Relacionado con los modelos numéricos de sedimentación y transporte en ambientes marinos, este mismo año 2001 se publican diferentes programas algunos de ellos recogidos en un número especial de la revista *Computers and Geosciences*, 27 (2001,

nº 6). Entre éstos pueden citarse: 2D SEDFLUX 1.0C (Syvitski y Hutton, 2001) o STORMSED 1.0 (Cookman y Flemings, 2001) que incorporan procesos de corta duración (efecto de las olas, tormentas, acción del viento) en un entorno uni o bidimensional. Son programas muy detallados y complejos aunque, por este motivo, se limitan a escalas temporales pequeñas.

Un año más tarde, Bitzer y Salas (2002) presentan la extensión a las 3D de su anterior trabajo (Bitzer y Salas, 2001). El modelo, llamado SIMSAFADIM, presenta una simulación tridimensional de la arquitectura y distribución de facies para sedimentos carbonatados. Éste es el modelo a partir del cual se centra el trabajo presentado en la presente memoria.

El mismo año, Warrlich *et al.* (2002), presentan un modelo de avance 3D (CARBONATE 3D) de plataformas carbonatadas que incorpora la presencia de dos tipos de sedimentos clásticos distintos y lo que ello supone en la evolución de una plataforma carbonatada. Los resultados obtenidos son muy realistas, aunque el programa utiliza leyes semi-empíricas para simular el transporte de sedimento y no considera el transporte fluvial de sedimentos siliciclásticos.

En el año 2003, utilizando el modelo anterior de Ritchie *et al.* (1999), Gawthorpe *et al.* (2003) investigan los controles en la variabilidad secuencial deposicional en semi-grabens extensionales desarrollados en ambientes marinos y por lo tanto sujetos a cambios eustáticos.

Para finalizar, cabe señalar que hasta la actualidad, la investigación científica se ha centrado en aumentar y perfeccionar los programas de simulación. No obstante, en su mayoría son bidimensionales y se basan en ecuaciones empíricas para simular el transporte y deposición de sedimento. Algunos de ellos han sido, y son, “cajas negras”, para los que no se ha publicado el código fuente o los algoritmos utilizados, lo que puede provocar una repetición del trabajo por parte de otros investigadores o un freno en el avance científico.

Por otra parte, también hay que reseñar que las leyes que rigen el transporte y deposición de sedimentos son complejas, sobre todo por tratarse de procesos que actúan en las tres dimensiones del espacio, y por consiguiente su correcta simulación pasa por programas complejos que requieren tiempos de cálculo elevados y equipos informáticos muy potentes. Los primeros programas centrados en las tres dimensiones del espacio no aparecen hasta mediados de los años 90, aunque la mayoría de ellos simplifican el transporte de sedimento como un proceso difusivo. Los pocos que intentan simular los procesos de manera más realista han visto como sus programas se limitan a escalas temporales cortas (por ejemplo los programas centrados en la modelización del

transporte y sedimentación a escala oceánica, como puede ser el modelo de Haupt *et al.*, 1999), con resultados muy satisfactorios si bien no aplicables a escala geológica.

[↶ Arriba](#)

[Índice ↴](#)