



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 – Compartir Igual 4.0. Espanya de Creative Commons.**

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

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

Capítulo 7

Conclusiones y consideraciones finales

- 7.1 [***Introducción***](#)
- 7.2 [***Conclusiones finales***](#)
- 7.3 [***Futuras líneas de trabajo***](#)

[↶ Arriba](#)

7.1 Introducción

En este capítulo se exponen las principales conclusiones que se obtienen del trabajo presentado y centradas en la aplicación del programa SIMSAFADIM-CLASTIC, tanto de su comparación con resultados analíticos como de la realización de los experimentos basados en ejemplos reales.

Durante los años de investigación han surgido ideas y tareas que han quedado “aparcadas” y pendientes de solución. Por este motivo, en la parte final del capítulo se citan las posibles opciones y/o acciones de futuro para el código generado y se introducen, de manera simple, unas ideas básicas para llevarlas a cabo.

También se exponen las principales limitaciones que presenta el programa SIMSAFADIM-CLASTIC desarrollado y, en consecuencia, lo que suponen en relación con los resultados obtenidos. Estas limitaciones pueden derivar del mismo algoritmo utilizado o de problemas que han surgido mientras se realizaba y se mejoraba el programa.

[↶ Arriba](#)

[Índice ▲](#)

[↶ Arriba](#)

7.2 Conclusiones finales

Según todo lo expuesto en la presente memoria y teniendo en cuenta los objetivos establecidos en la presente tesis, puede afirmarse que una de las principales aportaciones cumple con el objetivo principal establecido en la misma. En este sentido, se ha realizado un programa informático basado en la simulación de procesos que incorpora la interacción, en 3D, entre diferentes tipos de materiales carbonatados y tres tipos de materiales clástico-terrágenos diferentes.

Las principales limitaciones que contiene el código generado responden básicamente a las simplificaciones utilizadas en la modelización de los diferentes procesos que el programa contempla. Aún presentando estas limitaciones, es remarcable la versatilidad de experimentos que se pueden generar y en los que se puede aplicar el programa gracias a un gran número de datos y parámetros controlados y definidos por el usuario.

Otro punto a destacar se centra en la obtención, por parte de los resultados extraídos por el programa, de una distribución tridimensional de la heterogeneidad presente en el registro sedimentario, logrando una base de datos distribuida en las tres dimensiones del espacio con las características físicas, químicas y petrológicas que definen cada uno de los puntos del sistema bajo estudio. Este hecho es importante en el campo de la hidrogeología ya que permite realizar cualquier tipo de cálculo sin necesidad de introducir manualmente toda la información geológica necesaria de la cuenca o acuífero. De este modo, los resultados obtenidos por el programa SIMSAFADIM-CLASTIC podrían ser, por ejemplo, los datos de entrada de otros programas para realizar cálculos posteriores.

Cabe destacar, también, que uno de los mayores aportes de cualquier modelo de avance (o *forward modelling*) es su aplicación de una forma sistemática y “relativamente” rápida variando sólo unos pocos parámetros y obteniendo unos resultados en tiempos *acceptables*. En este sentido, también es destacable la flexibilidad que supone extraer resultados sin la necesidad de un gran número de datos de campo derivados de estudios indirectos.

Los programas desarrollados para complementar la modelización y automatizar la visualización de los resultados (NODEMAKER, CREATESCRIPTS y Visualization GOCAD), permiten acelerar y facilitar el trabajo a realizar, ya sea facilitando la discretización de la zona bajo estudio o agilizando el post-procesado de los resultados

obtenidos para su rápida visualización. Aún así, estos programas no son exclusivos de la modelización realizada y pueden ser substituidos por otros en función de su disponibilidad.

Teniendo en cuenta un aspecto más teórico, el sistema de flujo y transporte bidimensional utilizado podría considerarse simple, aunque esta simplicidad permite establecer de manera general un patrón coherente y fiable del sistema de flujo presente y del transporte de sedimentos resultante utilizando tiempos de cálculo muy aceptables y que permiten una modelización a escalas temporales grandes (miles de años).

Para finalizar, y centrado en la parte más aplicada del programa, las conclusiones que se extraen pueden agruparse en cinco puntos diferentes:

- **Soluciones analíticas:** mediante la comparación de los valores analíticos para el transporte difusivo y dispersivo con los obtenidos por el programa SIMSAFADIM-CLASTIC se puede afirmar que éstos son muy parecidos a los primeros y que los errores obtenidos son mínimos o se consideran dentro de los márgenes aceptables. No se puede decir lo mismo para la componente advectiva de la ecuación del transporte, la cual provoca errores importantes en el volumen de sedimento presente en situaciones donde el sistema de flujo está dominado por la advección (números de Grid-Peclet superiores a 2).
- **Balance de masa:** relacionado con el punto anterior y con el error debido a la componente advectiva de la ecuación del transporte, el método de control del balance de masa utilizado (BMFC) es un método sencillo y eficaz que no conlleva un aumento considerable del tiempo de cálculo. Este método permite ajustar automáticamente el volumen de sedimento real presente en el sistema a partir de un control del volumen de sedimento que entra, que sale y que se queda dentro (tanto en suspensión como depositado) para cada intervalo de tiempo de cálculo $\Delta t_{Courant}$. De este modo se obtienen errores muy bajos y próximos al 0%.
- **Transporte difusivo:** la comparación realizada entre dos métodos de transporte de sedimento diferentes, uno considerando sólo procesos de difusión y el otro (utilizado en el programa SIMSAFADIM-CLASTIC) procesos de difusión-dispersión-advección, permite deducir un error importante en el transporte de sedimento si se utiliza un modelo únicamente por difusión pura. Este error se debe principalmente al transporte de sedimento que se produce en todas las direcciones del espacio debido a la componente difusiva de la ecuación

del transporte y que provoca un transporte en dirección y sentido contrario al del flujo que se pretende modelizar.

- **Cuenca del Vallès-Penedès:** Los resultados obtenidos en el experimento realizado en la cuenca del Vallès-Penedès permiten corroborar el algoritmo presentado en esta tesis y que conlleva la interacción entre sedimentos clásticos y carbonatados. El experimento, aún conteniendo simplificaciones importantes, extrae resultados muy realistas, con distribuciones de facies y arquitecturas deposicionales muy parecidas a las observadas en la realidad. En este sentido, la arquitectura deposicional y la distribución de facies de los sistemas carbonatados observados en el modelo responden perfectamente a la presencia de sedimentos clásticos en suspensión que provoca una restricción de las plataformas carbonatadas en el margen SE y una disminución de su potencia en dirección NE a medida que aumenta la proporción de sedimentos clásticos.

Por otra parte, la distribución de facies que se obtiene en los márgenes NE y NW es coherente y responde, de manera general, a la realidad observada en estos márgenes de la cuenca. Los diferentes sistemas deltáicos obtenidos presentan morfologías progradantes hacia el interior de la cuenca, y se observa un mayor desarrollo de los sistemas situados en el margen NE debido a un mayor aporte axial de sedimento hacia la cuenca.

- **Embalse de Camarasa:** de los resultados extraídos en este ejemplo se puede deducir que, en la actualidad, existe una limitación importante del modelo al no poder considerar una estratificación de la columna de agua y que se puede observar en la realidad. Aún así, los resultados se aproximan muy bien al transporte de sedimento que se produce en el embalse debido a la dinámica de la capa más profunda y que transporta gran parte del sedimento que entra en el embalse. La distribución de facies obtenida (bimodal) permite deducir la presencia de un sedimento dominante (el más fino) que ocupa un área mayor dentro del embalse y que se complementa con el sedimento mediano considerado. De todos modos, la distribución final está muy condicionada por la apertura o no de la presa. El sedimento más grueso es el menos presente y se concentra en la zona de entrada. Las tasas de sedimentación obtenidas en la zona de La Massana son muy similares a las obtenidas en estudios anteriores para la misma zona, lo que sugiere un origen del sedimento depositado principalmente del sedimento transportado por la capa más profunda y una contribución menor de las capas suprayacentes. No es así en las otras zonas más próximas a la presa, donde el modelo proporciona tasas de sedimentación más bajas que las reales debido, principalmente, a una capacidad transportadora

más alta de las capas más superficiales y, por lo tanto, a una contribución mayor de estas capas al sedimento depositado y que no ha podido ser modelizada en el experimento.

Para finalizar, destacar que el programa SIMSAFADIM-CLASTIC se presenta como un programa de simulación basado en procesos capaz de predecir, en 3D, la arquitectura deposicional y la distribución de facies de un modo coherente y realista en cuencas sedimentarias. De este modo, el programa, en su estado actual o en futuras ampliaciones, puede ser útil en diferentes campos de investigación geológica, hidrogeológica o incluso de exploración petrolífera incluyendo la modelización del flujo de fluido a escala de cuenca.

[↶ Arriba](#)

[Índice ↴](#)

7.3 Futuras líneas de trabajo

El código desarrollado intenta, principalmente, la simulación de determinados procesos geológicos presentes en cuencas sedimentarias. Este hecho provoca que, por propia definición, se establezcan una serie de simplificaciones que intentan acercarse, dentro de lo posible, a la realidad y que conllevan una limitación inherente del propio modelo. Cabe recordar que el modelo más perfecto siempre será la realidad en sí misma.

Aunque el programa permite plantear una gran variedad de situaciones geológicas, existen ciertas limitaciones que, en algunos ejemplos, pueden hacer perder realismo a la modelización extraída hasta el punto de ser inservible. Estas limitaciones se deben a las principales simplificaciones realizadas, y, por lo tanto, se corresponden con las posibles acciones de futuro a realizar en el programa. A continuación se enumeran las principales limitaciones y las posibles acciones de futuro. A su vez, se proponen diferentes ideas para llevarlas a cabo, aunque cabe remarcar que sólo son ideas y que las posibles soluciones mostradas no han sido probadas ni verificadas.

- **Procesos de erosión**

Una limitación importante, hasta la actualidad, se encuentra en la no consideración de los procesos de erosión. Esta simplificación puede limitar los ejemplos realizados en zonas donde los procesos erosivos son dominantes. Ante esta limitación cabe decir que, en el presente código desarrollado, la introducción de la erosión es un apartado difícil, aunque no imposible. Al ser un proceso presente en muchos ambientes y situaciones geológicas, su inclusión dentro del programa parece ser una prioridad.

De manera simple y resumida, se puede conceptualizar el proceso de la erosión mediante las siguientes ideas básicas: es preciso tener un control tridimensional de los cuerpos sedimentarios anteriormente depositados; la erosión estará en función de la velocidad del flujo y la compactación del sedimento previamente depositado; a partir de un valor crítico de la velocidad del flujo (Hjülstrøm, 1935) existe una cantidad de sedimento depositado que se incorpora al sedimento en suspensión presente en la columna de agua; este sedimento será transportado hasta que la velocidad del flujo disminuya por debajo de la velocidad crítica de deposición del sedimento considerado.

Aunque conceptualmente parece un proceso sencillo, la dificultad radica en la distribución tridimensional de los diferentes tipos de sedimento en una misma capa y la cantidad de cada uno de ellos que estaría en disposición de ser erosionada (en función de su compactación). Una sola capa de arcilla de pocos centímetros de grosor puede controlar la no erosión de sedimento que, sin esa misma capa, pasaría a formar parte del sedimento transportado. Cabe recordar que, actualmente, en el programa SIMSAFADIM-CLASTIC una capa de sedimento depositado (correspondiente a un intervalo de tiempo jti) está formada por una mezcla de los diferentes tipos de sedimento considerados, haciendo imposible controlar, por ejemplo, el efecto que pueda tener la existencia de una pequeña capa arcillosa.

A este hecho se le añade otra limitación, una incompatibilidad entre procesos en un mismo instante. Es decir, como no todos los tipos de sedimentos se comportan igual, por las características físicas de cada tipo de sedimento y la velocidad del flujo presente, puede darse el caso en que un tipo de sedimento pueda ser erosionado, pero otro tipo de sedimento, bajo las mismas condiciones y en el mismo instante, pueda ser depositado (figura 7.1). Este ejemplo es muy difícil de codificar ya que se producen dos procesos

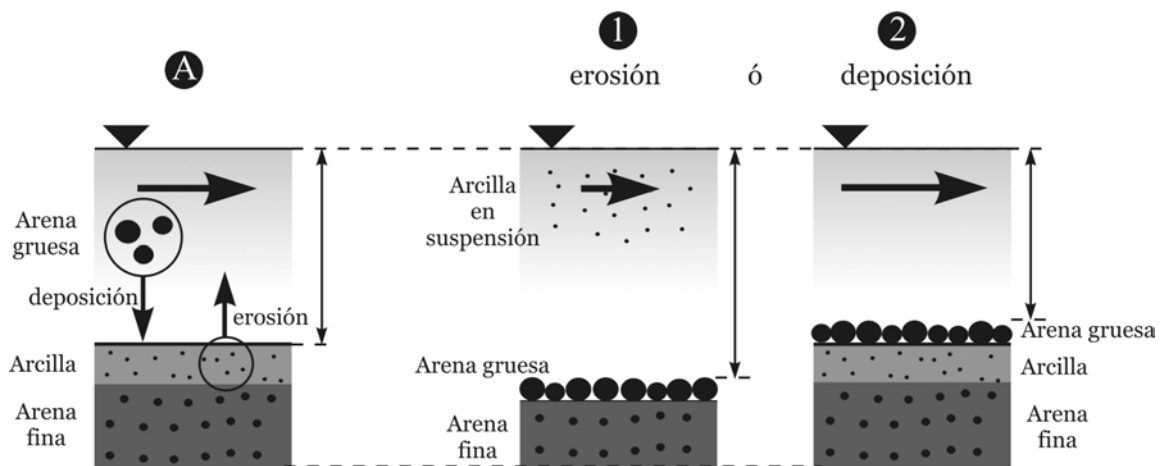


Figura 7.1.- Esquema de evolución de un perfil teórico (A) en función del proceso dominante (erosión o deposición). En función del flujo de agua presente (flecha horizontal) puede existir la deposición o erosión de diferentes tipos de sedimento en un mismo instante. Según si se considera primero la erosión o la deposición el resultado puede ser muy distinto. **Opción 1:** Si primero se considera la erosión existe una cantidad de arcilla anteriormente depositada que pasa a formar parte del sedimento en suspensión y puede ser transportada. La profundidad puede aumentar (en función de la arena gruesa que se deposite en segundo lugar) y la velocidad de flujo puede disminuir. **Opción 2:** Si es la deposición el primer proceso que se considera, no existe sedimento anteriormente depositado que pueda ser transportado en suspensión ya que la deposición de la arena gruesa no permite la erosión del sedimento. La profundidad de agua disminuye y la velocidad de flujo puede aumentar. Nótese como, en función del proceso que actúa primero se obtienen perfiles muy diferentes y, por tanto, la evolución del perfil será muy distinta en uno u otro caso, condicionando totalmente el resultado final.

*Evolution of a theoretical profile (A) depending on the dominant process (erosion or deposition). Depending on the fluid flow strength (horizontal arrow) could produce deposition or erosion of different sediment types at the same time step. If the program assumes first erosion or deposition, the result may be very different. **Option 1:** If the program considers first erosion, there is a portion of lime (previously deposited) that can be transported. Water depth can increase and flow velocity will be reduced. **Option 2:** If the program assumes that deposition is the first process, then there is no sediment to be transported because the deposition of the coarse sand causes that erosion will not be allowed. Water depth can decrease and flow velocity will be increased. Note that, depending on the first process acting, the result is very different and, obviously, the evolution of the depositional profile will be different too.*

totalmente contrarios en un mismo punto para sedimentos diferentes, y el hecho de que uno se produzca antes o después del otro puede condicionar totalmente el resultado final haciendo que se erosione o deposite más o menos sedimento y la cantidad de sedimento que, en consecuencia, pueda ser transportada.

- ***Procesos tectónicos***

Otra limitación es la no inclusión de procesos tectónicos asociados a movimientos de fallas, ya sean normales o inversas. En presencia de fallas, éstas tienen una entidad propia y definida dentro de la malla de elementos finitos, y existe un movimiento vertical de los mismos en función del tiempo. Para poder simular el movimiento de la falla es imprescindible una discretización a partir de elementos finitos tridimensionales, hecho que conlleva una complicación en los cálculos a realizar (con tiempos de cálculo muy elevados). Además, en el programa SIMSAFADIM-CLASTIC, la malla de elementos finitos utilizada para el cálculo del flujo y transporte es 2D, y, por lo tanto, incompatible numéricamente con mallas de elementos 3D.

Hasta la actualidad sólo se consideran procesos de compensación isostática y subsidencia uniforme de la cuenca aunque de un modo general y que no responde instantáneamente a los cambios por acumulación del sedimento. La introducción de movimientos por fallas, o por procesos de subsidencia diferencial o un algoritmo más completo y preciso de compensación isostática aportaría un control más real a los modelos generados, aunque su acoplamiento presenta, actualmente, muchas dificultades.

- ***Procesos en ambiente continental***

Un paso adelante muy importante para el programa sería complementar el presente código, centrado principalmente en ambiente marino, con los procesos que se producen en ambiente continental. A partir de aquí, se establecería un control total en la evolución de una cuenca.

No obstante, este hecho presenta, actualmente, una limitación importante: la duración temporal de los diferentes procesos que se producen en ambiente continental y marino. Como se ha indicado en el apartado 4.2.2, el intervalo de tiempo al que avanza el programa viene determinado por el criterio de Courant para asegurar la estabilidad de la solución numérica, y, normalmente, proporciona valores desde años hasta valores próximos al año. En ambiente continental la duración temporal de los diferentes procesos es más corta (minutos, horas, días o meses). Esto conlleva una dificultad en el

momento de acoplar los diferentes procesos en un intervalo de tiempo unificado para los dos ambientes y los procesos que en ellos se dan, y es casi imposible hacer avanzar el programa en dos incrementos de tiempo diferentes cuando los procesos que actúan lo hacen simultáneamente.

Como se puede ver, este propósito no tiene una solución trivial y conlleva muchos problemas de acoplamiento entre los diferentes ambientes. Por este motivo, es probable que su solución pase por un cambio importante en la forma de atacar el problema (ya sea a nivel del modelo de flujo utilizado como para el intervalo de tiempo de avance del programa).

- ***Nivel eustático***

Relacionado con el punto anterior, el programa SIMSAFADIM-CLASTIC presenta una limitación en los cambios del nivel del mar. Estos cambios sí que están considerados en el programa, pero existen limitaciones en su uso. Si se considera una situación con un descenso del nivel del mar, pueden existir nodos que pasen de ambiente marino a ambiente continental (subaéreos) y, por lo tanto, con un sistema de flujo diferente.

Por este motivo, si se quieren realizar ejemplos con cambios eustáticos, los contornos de los experimentos a generar nunca deben situarse justo en la línea de costa o en zonas con profundidades muy bajas. Estas zonas críticas son susceptibles de ser rápidamente colmatadas por la deposición del sedimento y provocar que existan nodos subaéreos al producirse una disminución del nivel del mar.

En estos casos problemáticos, es imprescindible conocer una tasa media de deposición y los rangos de variación del nivel del mar para poder ajustar y situar mejor los contornos del experimento.

Cabe decir, que actualmente ya existe una versión del programa SIMSAFADIM (Bitzer, 2004) que ya contempla una adaptación de la malla de elementos finitos en función de los cambios del nivel del mar.

- ***Sistema de Flujo***

El sistema de flujo por potencial utilizado en ambiente marino también presenta limitaciones, ya que es simple y no considera eventos de corta duración. Este sistema de flujo podría substituirse por otros sistemas más complejos y realistas que contemplaran,

por ejemplo, la circulación debida a los vientos superficiales o la refracción causada por la acción de las olas.

El flujo en ambiente marino contiene una trayectoria circular y helicoidal que provoca que las ecuaciones que rigen el flujo sean complicadas y trabajen en las tres dimensiones del espacio. Por este motivo el sistema utilizado es bidimensional, hecho que también simplifica el modelo, ya que considerar las 3D conllevaría una serie de cálculos innecesariamente largos (con la consecuente ralentización del programa en el tiempo de cálculo) y que no mejorarían cualitativamente el resultado obtenido si se pretende modelizar a escala geológica.

- ***Aumento del numero de materiales***

El número de materiales diferentes que contempla el programa en la actualidad (cuatro) no es una limitación en sí misma, aunque sí lo es el hecho de limitar la posible heterogeneidad de facies extraídas por el programa. La introducción de más tipos de materiales aumentaría la diversidad de facies y la complejidad de los resultados obtenidos, así como las posibles aplicaciones del programa. Entre otros, se podrían incluir sedimentos evaporíticos, carbones o la carga de fondo.

Para los sedimentos evaporíticos ya existe una versión del programa SIMSAFADIM (Bitzer, 2004) que lo contempla, teniendo en cuenta: grado de salinidad e hidroquímica del agua marina o lacustre; evaporación de agua y consecuente aumento de la salinidad; variación del sistema de flujo debido a los procesos de evaporación; secuencia de precipitación para los diferentes tipos de materiales evaporíticos en función del grado de saturación en sales.

Para la carga de fondo, la solución es más complicada. Para este tipo de materiales, los tiempos de reacción (sedimentación o transporte) disminuyen a valores de minutos o horas, ya que sus movimientos son rápidos y discontinuos. Este hecho provoca una incompetencia con los tiempos de reacción para los demás tipos de sedimento clástico que pueden llegar a ser de días o incluso meses.

- ***Procesos post sedimentarios***

Otros posibles cálculos a introducir en el programa podrían estar ligados a procesos post sedimentarios. Una vez terminados los cálculos del relleno de una cuenca sedimentaria con el programa SIMSAFADIM-CLASTIC, se obtiene una base de datos completa en cada punto (x,y,z) de la cuenca con los parámetros físicos, químicos,

petrológicos y petrográficos de los diferentes cuerpos sedimentarios generados. En este punto sería interesante controlar, por ejemplo, los diferentes procesos de evolución térmica, circulación de fluidos, transporte de solutos, compactación, generación y migración de hidrocarburos, etc.

[↶ Arriba](#)

[Índice ↴](#)

