

VOREST: Modelización de bosques mediante diagramas de Voronoi *

Begoña Abellanas †

Manuel Abellanas ‡

Carlos Vilas §

Abstract

In this paper the software VOREST [1] is described. It is a *single-tree model* forest modeler based on the spatial competition among trees. The main tool supporting the software are weighted Voronoi diagrams with limited range regions.

1 Introducción

En este trabajo se describe el modelizador de bosques VOREST. Se trata de una herramienta que permite simular la evolución de un bosque.

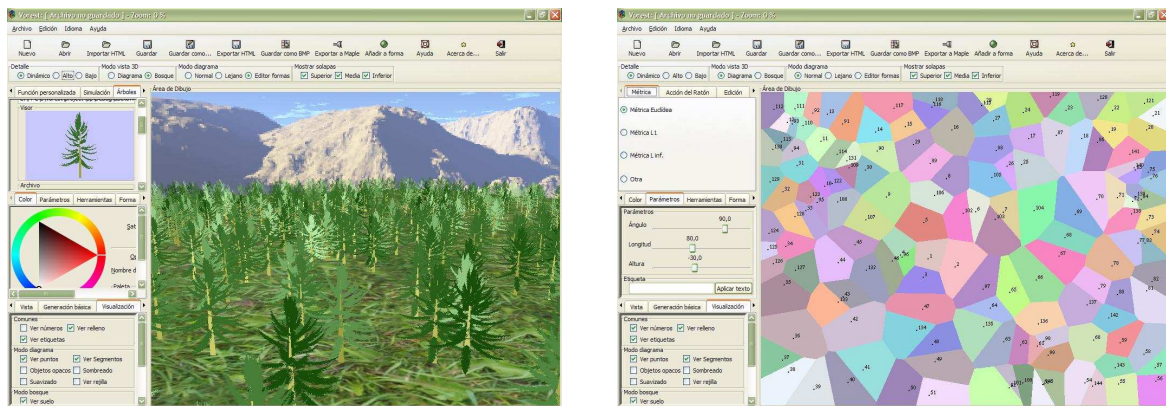


Figura 1: Entorno gráfico de VOREST: Modelo de bosque y su correspondiente diagrama de Voronoi.

El desarrollo de los árboles de un bosque depende en gran medida del espacio del que disponen tanto en el terreno como en el espacio aéreo donde se desarrollan las copas. La competencia que se produce entre los árboles por dominar el espacio para poder desarrollarse hace que estos sistemas biológicos estén directamente relacionados con los diagramas de Voronoi. En efecto, un diagrama de Voronoi puede verse como la partición del espacio resultante de la expansión de los sitios que lo generan (ver [5]).

La herramienta que aquí se presenta tiene como objetivo permitir el estudio de la influencia que el espacio ocupado por los árboles tiene en el desarrollo de un bosque incluyendo la dinámica de transferencia de dicho espacio entre árboles vecinos en función de sus estrategias vitales y las consecuencias en términos de crecimiento y mortalidad de los árboles. Se trata, por tanto, de una herramienta de ayuda a la investigación forestal.

*Parcialmente subvencionado por CAM P-DPI-000235-0505 (Gatarvisa).

†Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, ir1aboab@uco.es

‡Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, mabellanas@fi.upm.es

§Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, carlosvilas@hotmail.com

Emplea los diagramas de Voronoi generalizados con diferentes pesos y diferentes funciones de medida en cada punto. Para ello se obtienen los diagramas de modo gráfico como resultado de la proyección de la envolvente inferior de las funciones de distancia.

La siguiente sección recoge una clasificación de los diferentes modelos de crecimiento forestal que permite situar VOREST entre los modelos de árbol individual y conocer las características generales de estos modelos. La sección 3 describe la aplicación VOREST

2 Modelos de crecimiento forestal

Los *modelos de simulación de bosques* o *modelos de crecimiento forestal* son muy útiles para los gestores e investigadores forestales en muchos sentidos. Los usos más habituales para los gestores son la obtención de predicciones de la producción de madera o, menos frecuentemente, de otros productos forestales (piñas, corcho, etc.) y la ayuda en la simulación de distintas alternativas selvícolas con vistas a la toma de decisiones. Los modelos ayudan a predecir los efectos que puede tener a largo plazo una intervención selvícola, tanto en lo que respecta a la producción de madera como a las características futuras del propio bosque así como el impacto de las intervenciones sobre otros valores del bosque. Para los investigadores forestales, los modelos prestan su máxima utilidad en servir de herramientas para investigar acerca de la dinámica forestal.

Un modelo de crecimiento forestal pretende describir la dinámica del bosque de una forma suficientemente aproximada y precisa para los intereses del selvicultor o del investigador forestal. La dinámica incluye todos los procesos de cambio en los que consiste la vida del bosque y sus elementos fundamentales: los árboles. Los cambios más relevantes en el ámbito forestal son los que se refieren a la incorporación, crecimiento y muerte de los árboles. De ellos, el proceso más complejo es quizá el del crecimiento de los árboles, ya que se trata de un proceso largo y afectado por multitud de factores, tanto intrínsecos (edad, características genéticas) como extrínsecos (condiciones del medio físico, relaciones con los árboles vecinos, perturbaciones). Algunos de estos factores son, en sí mismos, factores variables (como la edad, la vecindad de otros árboles, algunos de los factores ambientales, como los meteorológicos o las perturbaciones); y aún algunos de ellos son difícilmente predecibles, como los meteorológicos o las perturbaciones. Esto hace que la simulación del crecimiento de los árboles en el bosque resulte altamente compleja, y se recurra, en muchas ocasiones, a utilizar aproximaciones estocásticas que proporcionen una distribución de probabilidades de los comportamientos futuros más que una predicción determinada.

Existen multitud de modelos de crecimiento forestal. Según Vanclay (1994) [9], podemos clasificarlos atendiendo a distintos criterios. Según el nivel de detalle, existen *modelos de rodal completo* o de masa -los más sencillos- en los que se predice el crecimiento del bosque en su conjunto a partir de la estimación de características poblacionales relacionadas con la cantidad de árboles o de biomasa leñosa por unidad de superficie (la densidad de árboles, el área basimétrica o las existencias en volumen); un nivel mayor de detalle aportan los *modelos de clases de tamaños de árboles*, que proporcionan estimaciones de la estructura poblacional del rodal, generalmente en términos de distribuciones de frecuencias de las clases de tamaños consideradas; los modelos más detallados son los *modelos de árbol individual*, en los cuales se simula el crecimiento del árbol individual.

La complejidad de los modelos y la dificultad de obtener los datos requeridos para definir el estado inicial son crecientes con el nivel de detalle mencionado. Así, para masas estructuralmente sencillas, como las masas regulares monoespecíficas, suelen ser preferibles los modelos de masa o rodal completo, pero para masas más complejas, como las masas irregulares o mixtas, o bien para simular el comportamiento a largo plazo o variaciones complejas y puntuales como pueden ser algunos tratamientos selvícolas, será necesario recurrir a modelos de árbol individual para conseguir unas predicciones realistas [4] El análisis de árbol individual también se está mostrando útil para la investigación forestal en ensayos experimentales a largo plazo (efecto del espaciamiento entre árboles o de la mezcla de especies) en los que la habitual mortalidad debida a avatares no predecibles suele invalidar en gran medida los resultados al desbaratar los diseños experimentales. Mediante el análisis individual se pueden obtener valores locales de las variables de masa que pueden aminorar estos problemas [10].

Los modelos de árbol individual simulan la evolución de las variables que definen un árbol concreto (fundamentalmente su tamaño). Entre estos destacan los modelos dependientes de la distancia o con distribución espacial (single tree spatial models), en los cuales, además de las características dendrométricas del árbol, se contempla su localización en el terreno a través de sus coordenadas, lo que permite utilizar en el modelo relaciones de competencia entre vecinos (pueden conocerse los vecinos de cada árbol y la distancia a ellos).

Los modelos de árbol individual dependientes de la distancia son muy útiles como herramientas de investigación para estudiar el efecto de ciertas prácticas selvícolas sobre aspectos que las variables de masa no pueden describir satisfactoriamente, como es la estructura espacial del rodal [3]. La diversidad estructural es, hoy día, una característica dasométrica de alto valor, ya que se ha mostrado como uno de los factores más ligados a aspectos altamente valorados actualmente en los bosques como la biodiversidad. También son útiles para investigar sobre la dinámica de rodales con el fin de ilustrar el diseño de nuevos enfoques selvícolas inspirados en rodales existentes, cuyas características puedan ser interesantes para los nuevos enfoques de la silvicultura.

Los modelos de crecimiento de árbol individual con distribución espacial utilizan las distancias y tamaños de los árboles vecinos para estimar las relaciones de competencia que existen entre ellos y, junto con el resto de variables implicadas, deducir, a partir de esta información, el crecimiento de cada árbol en función de la competencia a la que esté sometido. Por ello, es necesario introducir una definición de dicha competencia en función de estos datos en los modelos [11]. Se han desarrollado muchos tipos de índices de competencia:

Índices basados en la consideración de que los árboles poseen una zona de influencia a su alrededor, dependiente del tamaño de éstos, en los que se define la competencia por el solape entre dichas áreas entre árboles vecinos; índices que definen la competencia en función de la razón entre el tamaño y la distancia entre árboles vecinos, e índices basados en el concepto de espacio disponible para el crecimiento, los cuales tratan de repartir el espacio vegetativo disponible entre los árboles del rodal en función de la distribución espacial de los árboles y sus tamaños relativos. La capacidad de crecimiento de cada árbol estará condicionada por la disponibilidad de espacio vegetativo que posea en relación a su tamaño (al margen del resto de los factores implicados como las características del medio físico, las características genéticas del individuo o incluso su edad), ya que dicho espacio vegetativo representa los recursos disponibles para el funcionamiento del árbol como sistema biológico. La competencia, en este caso, se considera a través de la mayor o menor reducción de dicho espacio disponible para el árbol debida a la asignación de parte del mismo a los árboles vecinos.

Una de las ventajas de utilizar el concepto de espacio disponible para el crecimiento es que puede relacionarse con otros factores que afectan al crecimiento como los factores ecológicos [11], [8]. Estos modelos permitirían investigar el efecto del micrositio, cuya influencia sobre las correlaciones espaciales de los tamaños de los árboles actúa en sentido contrario a la competencia y habitualmente no se ha tenido en cuenta en estos modelos [2], lo que posiblemente mejoraría la estimación de las características estructurales del bosque y su evolución.

Los modelos de árbol individual que tienen en cuenta el área disponible para cada árbol requieren del cálculo del diagrama de Voronoi de las posiciones de los árboles. Este hecho es bien conocido desde hace tiempo en la ingeniería forestal [6], [7]. De hecho estudios empíricos realizados ya en los años 80 sugieren que el área potencialmente disponible, ponderada por el tamaño del árbol, es uno de los mejores índices de competencia disponibles para predecir el crecimiento de los árboles en plantaciones forestales [9].

3 Descripción de la aplicación

VOREST es una aplicación actualmente en desarrollo cuyo objetivo pasa por ofrecer un entorno de simulación de crecimiento forestal mediante la utilización de diagramas de Voronoi [1].

El modelo que utiliza el programa se clasifica dentro del grupo de modelos de árbol individual (single-tree models), y parte del hecho de que el crecimiento de todo árbol puede explicarse en función del área de influencia que ocupa a su alrededor. Este área de influencia puede aumentar o disminuir en

función de ciertos factores, tales como la competencia que presentan los árboles de alrededor, y puede modelarse de manera adecuada como una región en un diagrama de Voronoi ponderado.

El cálculo de los diagramas de Voronoi generalizados con pesos (aditivos o multiplicativos) o con distintas funciones de distancia para cada generador, es una tarea complicada y en muchos casos costosa desde el punto de vista computacional. En el caso que nos ocupa, no son los vértices ni las aristas del diagrama lo que interesa conocer, si no el área de sus regiones. Por tal motivo, y como la aplicación a la modelización forestal admite cierta tolerancia en el cálculo, la aplicación no efectúa el cálculo exacto de diagramas de Voronoi. Por el contrario, se enfoca a la representación de estas estructuras en base a la visualización de la envolvente inferior de las funciones de distancia a los generadores, que mediante la utilización de las herramientas implementadas puede realizarse de manera completamente interactiva.

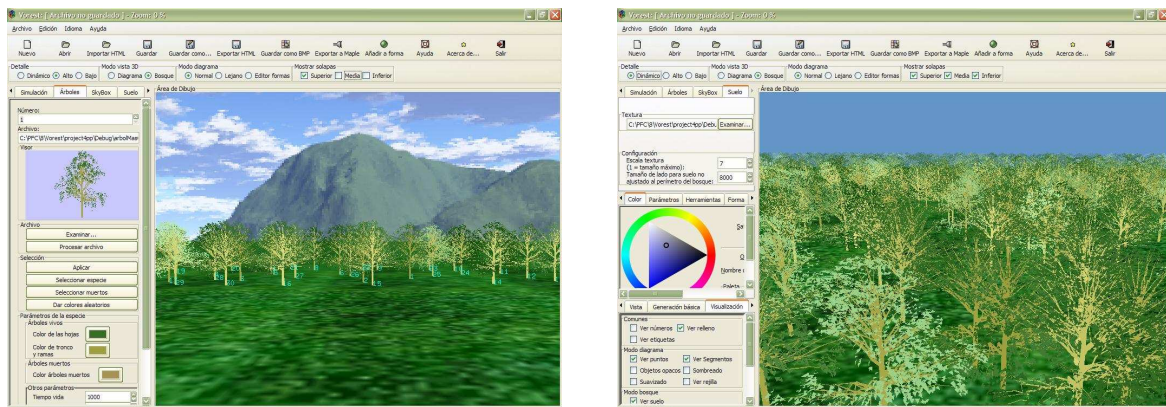


Figura 2: Opciones de modelado y visualización

Una vez representado, permite interpretar el diagrama obtenido como el conjunto de regiones de influencia de una serie de árboles estudiados.

Sin embargo la utilidad de la aplicación no se limita a la mera visualización interactiva de los diagramas, sino que permite realizar una simulación continua del proceso esperado de crecimiento para los árboles cargados en el programa. Es decir, partiendo de una situación inicial dada por el usuario (bien a partir de datos aleatorios, datos generados manualmente o datos reales cargados desde un fichero externo en formato HTML), es posible avanzar en el tiempo, obteniendo de esta manera una predicción del crecimiento de los árboles estudiados.

La información visual que ofrece la aplicación tiene dos vertientes fundamentales.

En primer lugar, permite representar el diagrama de Voronoi que modeliza las áreas de influencia de cada uno de los árboles cargados en el programa, en un instante determinado de su crecimiento, siendo posible utilizar tanto métricas predefinidas de la aplicación (métrica euclídea, L-1, L-infinito) como funciones de distancia definidas por el usuario (mediante la utilización del editor integrado de funciones de distancia)(Figura 3).

Por otro lado, permite generar una representación más o menos detallada del aspecto real que podría esperarse de los árboles estudiados en su entorno natural, es decir, la aplicación es capaz de generar una escena tridimensional con un grado de detalle suficientemente alto (aunque en todo caso lejano a lo que podríamos considerar un nivel fotorrealista) del aspecto que presentará el bosque en la realidad. En esta escena el usuario podrá utilizar desde texturas para mejorar el aspecto del suelo, hasta configurar la representación de una SkyBox, que permite un efecto básico pero eficaz de fondo tridimensional, todo ello guiado por la interfaz clara y sencilla de la aplicación (Figura 2).

Es importante apreciar el hecho de que los usuarios no necesitarán conocimientos informáticos específicos para generar el aspecto de cada una de las especies con las que vayan a trabajar.

VOREST utiliza como apoyo en la generación de bosques la aplicación de libre uso POV-Tree, que puede descargarse desde su página web (<http://propro.ru/go/Wshop/povtree/povtree.html>).

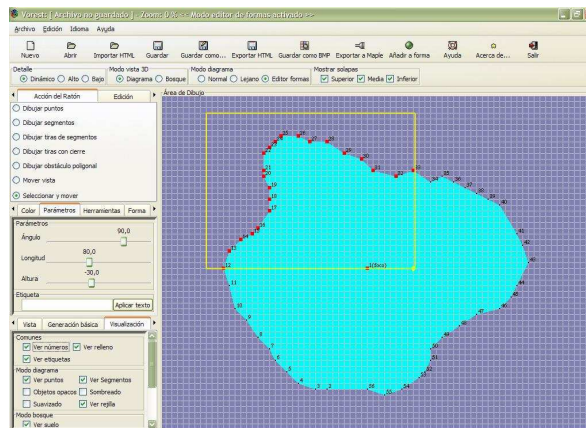


Figura 3: El editor de funciones de distancia permite al usuario definir la función de distancia, incluso no convexa, para cada árbol.

Mediante la utilización de esta aplicación, pueden generarse mallas tridimensionales de POV-Ray que representen de una forma más o menos realista las especies de árboles estudiadas por el usuario. La documentación sobre la misma es clara y abundante, y en todo caso su manejo no entraña complicaciones excesivas, siendo sencillo e intuitivo, y completamente visual.

VOREST facilita enormemente el trabajo con este tipo de ficheros de malla tridimensional, abstrayendo al usuario de la complejidad que subyace en su carga y manipulación, y permitiendo que concentre todos sus esfuerzos en el proceso de definición de especies, ajustando los parámetros de cada una y definiendo de manera completamente visual el color de tronco y hojas, o el color con que se representarán los árboles muertos de una especie dada.

Finalmente, la aplicación permitirá incluir multitud de especies simultáneas generadas por el usuario en el proceso de simulación.

El proceso de simulación que ofrece VOREST se basa, como hemos apuntado, en el hecho de que consideraremos que todo árbol tiene a su alrededor un área de influencia de mayor o menor tamaño, y que en función de dicho área podremos determinar el crecimiento futuro del individuo.

El aspecto realmente interesante es cómo expresar el crecimiento del árbol en función de dicho área. VOREST es capaz de calcular el área de las regiones de influencia automáticamente, pero ofrece al usuario la posibilidad de definir con gran flexibilidad el modo en que se producirá la simulación del crecimiento en función de dicha área.

El usuario tendrá gran libertad para definir las expresiones que actualizan los valores de los principales parámetros de crecimiento que resultan de interés: el nuevo radio de la región para cada uno de los árboles, la nueva altura del árbol en el siguiente instante de simulación, y el estado futuro del árbol (es decir, si seguirá vivo o pasará a considerarse muerto). Para ello, dispone de la posibilidad de escribir fórmulas matemáticas propias para cada uno de estos tres aspectos enumerados.

VOREST integra un parser o analizador de expresiones matemáticas de libre uso conocido como muParser y desarrollado por Ingo Berg en lenguaje C++, que puede descargarse de su página web en Internet (<http://muparser.sourceforge.net/>). Mediante la utilización y adaptación de dicho parser a los propósitos de la aplicación, los usuarios pueden trabajar con expresiones matemáticas y utilizar multitud de funciones predefinidas, incluyendo una sentencia condicional para el manejo de casuísticas variadas en el proceso. De nuevo, no se requieren conocimientos especialmente complejos de programación, pues a excepción de la función condicional, el resto de las expresiones se encuadra siempre dentro del lenguaje matemático convencional.

Además, la aplicación es capaz de analizar las expresiones definidas por el usuario antes del inicio de la simulación, ayudándole a depurarlas, y gestiona sin problemas todos los errores que pudieran

surgir a raíz de ellas en tiempo de ejecución (por ejemplo, divisiones entre cero). Así pues, los usuarios pueden definir las expresiones propias que dirigirán el proceso de simulación del crecimiento forestal.

Como aspectos que pueden implicarse en el proceso de crecimiento, el usuario dispone de total libertad para manejar diversos parámetros de interés sobre cada una de las especies estudiadas, aspectos globales que actúan sobre el entorno simulado, características propias de cada uno de los individuos, e incluso se ofrece la posibilidad de definir expresiones de carácter incremental (esto es, describir la asignación de valor a alguno de los parámetros de crecimiento en función de la variación de dicho valor entre dos iteraciones, la previa y la actual).

La aplicación permite avanzar paso a paso en el proceso de simulación o hacerlo de manera continua durante un número de iteraciones prefijado.

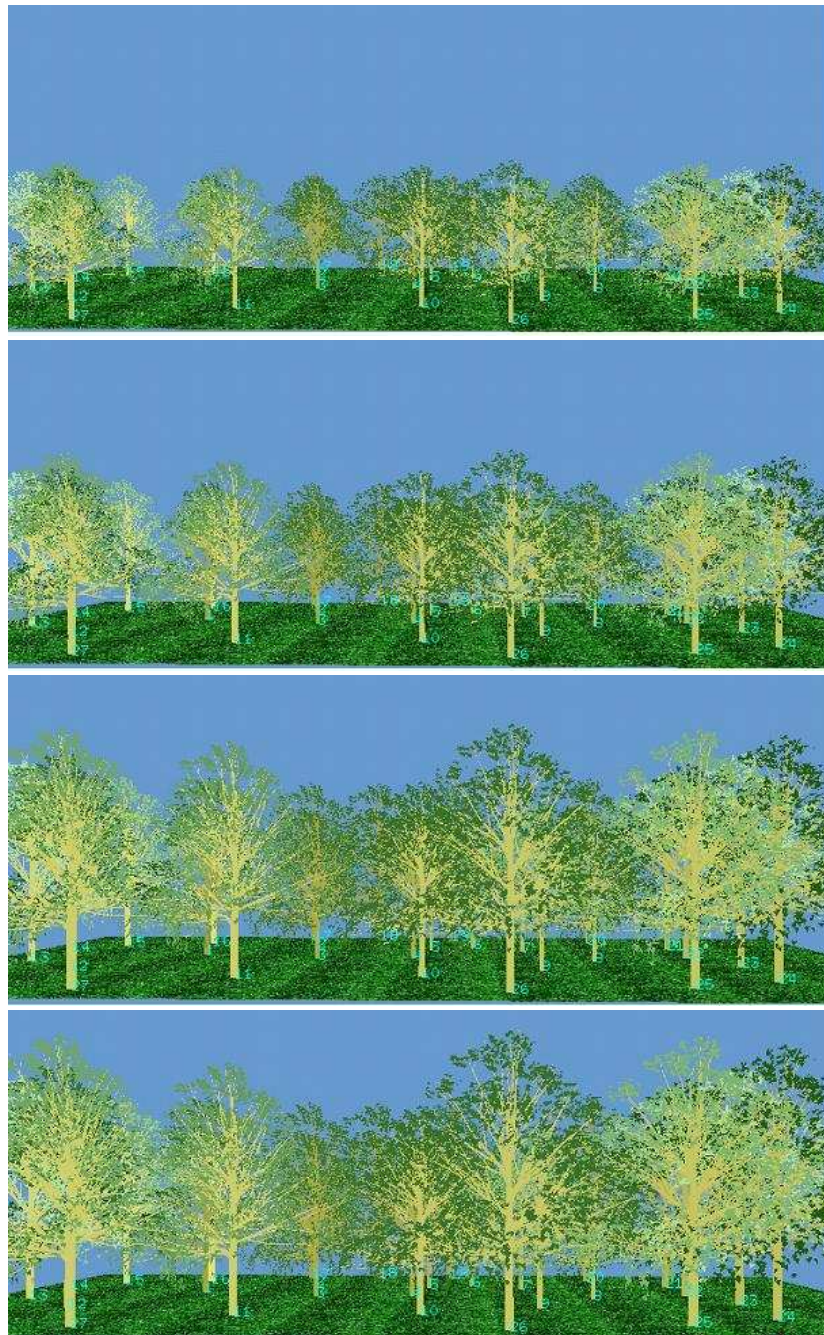


Figura 4: Ejemplo de la evolución de un bosque.

Puede guardarse automáticamente una traza del proceso seguido, tanto en forma de imágenes (en formato BMP)(figura 4) como en tablas de datos (en formato HTML).

En el proceso de simulación pueden intervenir multitud de especies diferentes, contando cada una con su propio aspecto y configuración de atributos.

La aplicación cuenta con una interfaz completamente visual, en la que todas las opciones disponibles quedan clasificadas de manera que los usuarios puedan seguir una curva de aprendizaje adecuada, posibilitando el trabajo a los usuarios inexpertos desde el primer momento, y poniendo fácilmente el resto de las opciones al alcance de los usuarios más avanzados.

En cualquier momento del proceso de generación de datos o simulación es posible, con la única utilización del ratón, desplazarse sobre los diagramas generados en dos dimensiones y en el arreglo de las gráficas de las correspondientes funciones de distancia en tres dimensiones, así como sobre los boques, aumentando o alejando la cámara y obteniendo de este modo las vistas más personalizadas.

El motor de la aplicación permite configurar el nivel de detalle de representación de los bosques obtenidos, aprovechando así el potencial de las máquinas más potentes al utilizar los niveles altos de detalle, o mejorando la eficiencia en las máquinas menores mediante la utilización de un modo de detalle dinámico en función de la posición del observador, basado en un método simple pero eficaz de modelos multi-resolución.

Finalmente, resaltamos el hecho de que la aplicación puede utilizarse para otros fines más allá de la simulación del crecimiento forestal, ya que ofrece posibilidades tales como la visualización de diagramas de Voronoi generados por segmentos, curvas poligonales y polígonos, manipulación y edición de distintos tipos de métricas, y demás características adicionales que hacen interesante su utilización como herramienta enfocada al campo docente o de ayuda a la investigación en Geometría computacional.

VOREST está siendo implementado en lenguaje C++, bajo entorno Windows, y necesita las librerías GTK (interfaz) y OpenGL (gráficos) para funcionar.

4 Conclusiones

La aplicación VOREST constituye una herramienta útil para la investigación en la Ingeniería Forestal y es un buen ejemplo de cómo la Geometría Computacional se aplica en problemas reales.

VOREST es un proyecto en desarrollo. Para obtener información actualizada, consúltese la página web [1].

Referencias

- [1] Abellanas, B.; Abellanas, M.; Vilas, C., VOREST. Forest modeller using Voronoi diagrams. <http://www.dma.fi.upm.es/mabellanas/VOREST>
- [2] Garcia, O. The state-space approach in growth modelling. Canadian Journal of Forest Research, 24:1894-1903. 1994.
- [3] García, O. Seminario sobre Modelos de Crecimiento. E.T.S.I.Montes Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. Silvopascicultura. 10-13 febrero 1998.
- [4] García, O. Growth and yield in British Columbia. Back-ground and discussion. 2001. <http://forestgrowth.unbc.ca/>
- [5] Mena, F., VorExpand, <http://www.dma.fi.upm.es/docencia/trabajosfindecarrera/..../programas/geometriacomputacional/Voroexpand/Vorexpan.html>
- [6] Moore, J.A.; Budelsky, C.A.; Schlesinger, R.C., A new index representing individual tree competitive status. Canadian Journal of Forest Research, 3:495-500, 1973.

- [7] Nance, W.L.; Grissom, J.E.; Smith, W.R. A new competition index based on weighted and constrained area potentially available. En: A.R. Ek, S.R. Shifley; T.E. Burk (eds) Forest Growth Modelling and Prediction. Proc. IUFRO Conf. Agosto 1987, Minneapolis. USDAFS GTR. NC-120:134-142. 1988.
- [8] Pukkala, T. Prediction of tree diameter and height in a Scots pine stand as a function of the spatial pattern of trees. *Silva Fennica*, 23:83-99, 1989.
- [9] Vanclay, J.K. Modelling Forest Growth and Yield. Applications to Mixed Tropical Forests. Ed. CAB Int. Wallingford. 312pp. 1994.
- [10] Vanclay J.K. Experiment designs to evaluate inter- and intra-specific interactions in mixed plantings of forest trees. *Forest Ecology and Management*, 233:366-374, 2006.
- [11] Von Gadow, K.; P. Real; J.G. Álvarez. Modelización del Crecimiento y la Evolución de Bosques. IUFRO World Series Vol. 11, Viena 2001