

Procedural generation of natural environments with restrictions

C. Gasch, M. Chover, I. Remolar

Univesitat Jaume I, Castellón, Spain

Abstract

Natural environments are a very important part of virtual worlds, both for video games and for simulators, but their manual creation can be a very expensive job. The procedural creation of these, allows to generate them easily and quickly, although there is no way to control the final result quickly and accurately.

The purpose of this work is to present a new method of creation, that allows the procedural generation of a natural environment for applications such as rail shooter. The vegetation of the natural environment will be placed automatically along the area of the route.

The method presented, is based on establishing on the ground a grid of points which are assigned a random function of probability of appearance of each species based on Perlin noise. In addition, the method draws from the heightmap the values necessary to distribute the natural elements. These values are combined along the distance of the route and next to a noise distribution, thus obtaining placement patterns that have a greater probability of occurrence in favorable points of the map and near the route.

The results show that the method allows the procedural generation of these environments for any heightmap, also focusing the realism and the placement of the natural elements in the user visualization zone.

CCS Concepts

Software and its engineering → Virtual worlds training simulations;

1. Introducción

La generación de vegetación es una parte muy importante en el modelado procedural de mundos virtuales. Su amplia gama de aplicaciones, como simulaciones, juegos serios y sistemas de información geográfica hace que, según el estudio de Smelik et al. [STB*14], haya sido tema de investigación durante más de treinta años. Según este estudio, la creación de mundos virtuales de forma manual es demasiado laboriosa y costosa, por ello, la generación procedural en este ámbito, es decir, el uso de técnicas que permiten la creación de contenido automáticamente, ha sido bien recibido.

La creación procedural de vegetación puede dividirse en la generación de partes de una planta, plantas completas o de entornos naturales. Este trabajo se centra en este último, la generación de entornos naturales para juegos de navegación automática por una ruta (juegos de navegación sobre raíles). Para este tipo de juegos, no es necesario generar un entorno natural con gran densidad para todo el mapa, sino que este debe centrarse en la zona de la ruta, ya que, desde esta zona no puede apreciarse el detalle ni la densidad de las zonas alejadas.

Como indica Onrust et al. [OBR*15], la mayoría de técnicas de generación de entornos naturales se centran en la simulación o generación de ecosistemas, mediante la obtención de puntos para la colocación de los elementos naturales. El problema de estas técnicas, es que tanto en la simulación como en la generación se presentan problemas para obtener una distribución de alta densidad y variedad a partir de los datos de entrada, como la cobertura o los requisitos de colocación de la especie, es decir, la altura a la que crece, la inclinación, etc. Analizando la literatura existente en la colocación automática de vegetación, no se ha encontrado un método eficiente que se adapte a los requisitos establecidos como necesarios en este trabajo. Siendo estos, que se permita la generación procedural de un entorno natural realista, independientemente del terreno que se vaya a usar. Además, deben poder aplicarse restricciones, no solo para la selección de las diferentes especies que se colocarán, sino también para poder distribuir los elementos en nivel de detalle para una aplicación de tipo raíl, es decir, dando mayor importancia en la colocación, teniendo en cuenta que la vista será siempre desde la ruta.

En este trabajo se propone un método para la generación procedural de entornos naturales orientado a juegos de raíles que estén restringidos a una ruta y sin necesidad de interacción con el usuario. El trabajo incluye la colocación de árboles y plantas,

rocas, texturas y efectos atmosféricos como el viento. El modelo de terreno que incluye esa ruta es un resultado de un trabajo previo [GCR*16], en el cual se presentó un método para generar proceduralmente un mapa de alturas aleatorio, con la restricción de una ruta. En el trabajo presentado se añaden restricciones para que la distribución de estos objetos se centre en las zonas cercanas a esa ruta, reduciendo su densidad a medida que se aleja. La colocación de los elementos naturales tanto de diferente tipo como del mismo, se obtendrá a partir de las características del terreno y además, de las características de los propios elementos, que indican las restricciones individuales de dónde pueden crecer. En este trabajo solo se han considerado como restricciones individuales, la altura a la que pueden crecer, la inclinación y la zona de espaciado necesario que debe haber entre dos elementos del mismo tipo.

El trabajo está organizado en varias partes. La sección dos considera el estado del arte previo y una clasificación de las técnicas existentes en la generación de entornos naturales. La sección tres proporciona los detalles de la implementación del método propuesto. La sección cuatro explica las técnicas de visualización utilizadas. La sección cinco ofrece los resultados obtenidos con el método propuesto, y por último, la sección 6 contiene algunas observaciones de la solución presentada además del trabajo futuro.

2. Estado del arte

Las técnicas de colocación de vegetación pueden dividirse en técnicas de modelado ecológico y técnicas de generación procedural de ecosistemas [OBR*15]. El primer caso corresponde a aquellas que obtienen el resultado de la colocación a partir de datos externos reales, sobre el mapa o las plantas. El segundo caso, calcula la posición virtual de las plantas a partir de un cálculo procedural.

2.1. Técnicas de modelo ecológico

Estas técnicas se dividen entre dinámicas o neutrales. Las dinámicas simulan los procesos ecológicos y geofísicos, normalmente de un mapa ráster, del que extraen la altura, la biomasa y/o la cobertura de la vegetación [TBvdK*07] [RvdK08] [Sch14] [ACV*]. Por otro lado, los neutrales generan un mapa de posición por cuadrículas, basados en la información de la especie, generando patrones para cada especie y obteniendo para cada celda de la cuadrícula, la especie que le corresponde, ya sea a partir de un modelo MRC (Modified Random Clusters) [SM00] o un modelo basado en fractales [HHS02].

La desventaja de estas técnicas, según Onrust et al. es que tanto en las dinámicas como en las neutrales la posición de las plantas no se puede extraer de los mapas generados, aunque en la dinámica sí suelen contener información espacial del mapa con el paso del tiempo. Por otro lado, otro problema de las técnicas

neutrales es que suponen que las condiciones de cada planta son las mismas para todo el mapa.

2.2. Técnicas de generación procedural de ecosistemas

Este tipo de técnicas pueden dividirse entre técnicas de local a global y las de global a local. El primer grupo, las de local a global, utilizan la técnica de Sistemas-L multiconjunto para simular el crecimiento de las plantas y la competición entre ellas [DHC*98]. La ventaja de esta técnica es que permite añadir un comportamiento individual para cada planta, incluyendo la luz del sol o los recursos del suelo [Chn10]. Pero la desventaja está en que es una técnica poco controlable, ya que no es posible predecir el resultado antes de la simulación.

En el otro grupo, las técnicas de global a local, se calculan las posiciones de las plantas directamente de un entorno definido globalmente. Hammes [Ham01] utiliza un método que define ecotipos para un entorno específico según la altura del mapa y un factor aleatorio. Luego, según el ecotipo obtenido se dispersan las plantas de forma aleatoria. El resultado es limitado ya que la distribución final es completamente aleatoria y no sigue los valores de entrada usados para obtener el ecotipo. En otra técnica, [LP02] se combina un valor de probabilidad con un algoritmo de lanzamiento de dardos que permite colocar las plantas en sus zonas más probables. Además, cada planta puede tener efecto de vecindad en las restantes, actualizando dicha probabilidad. Aunque, con esta técnica el resultado final tampoco sigue una distribución estadística.

Alsweis y Deussen [AD06] presentan un método que permite la distribución de las plantas a partir de la combinación de la generación de puntos siguiendo la distribución de disco de Poisson con las celdas de Wang. Este método obtiene buenos resultados, pero no incluye distribución por especies. Más adelante, Weier et al. [WHD*13] extendió esta técnica a las especies combinando los métodos previamente discutidos de Hammes y Lane. Para ello se obtiene un mapa de puntos al que se le asigna una probabilidad para cada especie, asignándole la que mayor probabilidad tenga añadiendo además un valor aleatorio. A continuación se selecciona un conjunto de puntos con la desviación estándar más alta, y se utilizan para dar un valor de vecindad a los que los rodean. Se repite el proceso hasta un número máximo de iteraciones o los valores de vecindad no cambian. El problema de esta técnica es que puede ser costoso por el número de iteraciones y además, utilizando la vecindad no se asegura que se puedan generar diferentes patrones para las especies naturales.

Por último, Onrust et al. [OBR*15] presentan un método que combina la técnica procedural de colocación de plantas usando la distribución de disco de Poisson con celdas de Wang, con una técnica de modelado ecológico neutral. El método solo se ha probado con plantas, con lo que los resultados para un entorno natural completo se desconocen. Además, este método presenta

problemas con la posición de los impostores respecto a la cámara, ya que al colocarse independientemente de su ángulo, pese que desde la distancia es imperceptible, no lo es al acercarse.

3. Método de generación procedural de entornos naturales con restricciones

El método que se propone genera por un lado, una rejilla de puntos al que se le asigna una probabilidad de aparición de cada especie, mediante el uso de ruido. De forma, que el resultado final incluirá patrones de especies. Por otro lado, el método extraerá del mapa de alturas, los valores necesarios para decidir la distribución de los elementos naturales: árboles, plantas y otros elementos como rocas. Estos valores se combinarán junto a la distancia a la ruta y junto a una distribución de ruido, obteniendo así patrones de colocación, con mayor probabilidad de aparición en puntos favorables del mapa y cercanos a la ruta.

Una vez obtenida la distribución de los elementos naturales, se buscará la especie a colocar en dicho punto, en el mapa de probabilidades de especies.

3.1. Distribución de elementos naturales

Como ya se ha comentado, para obtener la probabilidad de aparición de los elementos naturales en el mapa final, se utilizan los datos extraídos del mapa de alturas, de la distancia a la ruta, del patrón resultante a aplicar ruido y de las características individuales de la especie.

Para todo ello se obtiene una rejilla de puntos, donde la separación entre ellos vendrá determinada por el espaciado de los elementos vegetales, es decir, la distancia mínima que debe haber entre dos elementos naturales del mismo tipo. Este valor vendrá dado según sus características, junto al rango de alturas y de inclinación en las que la especie puede crecer.

Características del terreno

El método se aplica sobre un mapa de alturas, como el mostrado en la Figura 1, que contiene una ruta, la cual es un conjunto de coordenadas consecutivas. De este mapa de alturas se extrae la altura y el ángulo de inclinación de cada punto del terreno. Con estos valores se calcula la probabilidad de aparición de vegetación en cada punto del mapa, de forma que se dará mayor probabilidad en zonas bajas (zonas más claras) y con menor inclinación.

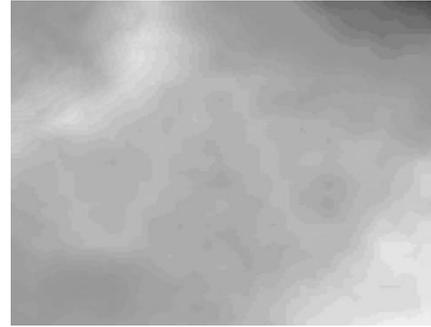


Figura 1: Mapa de alturas con una ruta serpenteante.

Mediante la obtención del ángulo de inclinación y la altura de cada punto del mapa, se podrá saber en cada especie, a partir de la información de a que inclinación y altura pueden crecer, los límites a los que podrán aparecer, de forma independiente al valor de probabilidad obtenido. Es decir, si un árbol requiere que el terreno sea plano para poder crecer, en aquellos puntos donde la inclinación supere cierto ángulo, aunque la probabilidad de aparición sea 100%, este no se colocará.

Finalmente, al normalizar los resultados, se obtienen dos rejillas de puntos con valores entre 0 y 1, donde, al invertirlos, aquellos más cercanos a 1 serán los puntos más bajos y con menos pendiente y los más cercanos a 0 los más altos y con más pendiente. En la Figura 2, se muestran las dos rejillas de puntos resultantes al obtener la probabilidad basada en la altura del terreno y la inclinación. Para representarlo, se ha utilizado una escala de colores, donde el rojo es las zonas con menor probabilidad (0-0.2), morado (0.2-0.4), azul (0.4-0.6), verde oscuro (0.6-0.8) y verde claro el restante.

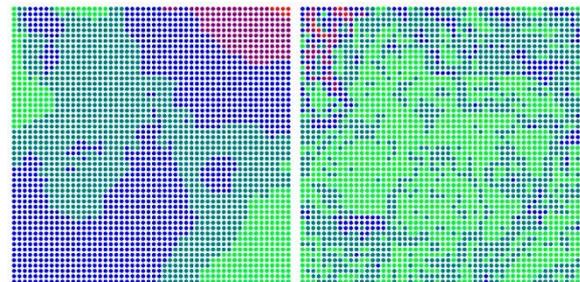


Figura 2: Rejillas con puntos de diferentes colores representando la probabilidad de colocación según la altura del terreno y el ángulo de inclinación.

Ruido de Perlin

Con la obtención de la altura y la inclinación se obtiene un mapa con una distribución de vegetación regular, que solo desaparece en los puntos altos y con mucha inclinación. Pero en la naturaleza esto no es así, sino que para una misma altura puede haber zonas con mayor densidad y otras con menor. Por ello, para asegurar esta característica y además evitar cambios bruscos en la densidad, se ha utilizado el método de ruido de Perlin [Per85].

Este método se caracteriza por generar valores aleatorios a diferentes niveles que varían en el espacio o el tiempo. En cada nivel, se obtiene un valor aleatorio por cada nodo, los cuales aumentan en frecuencia y disminuyen en amplitud al aumentar el nivel. El resto de valores para cada nivel se obtienen mediante una interpolación bilineal a partir de los cuatro nodos que rodean el punto a calcular, de forma que, al sumarse todos los niveles se obtiene una turbulencia, como la representada como una textura en la Figura 3.

Al normalizar la matriz obtenida, lo que se tiene es una rejilla de puntos entre 0 y 1 que nos dará la probabilidad de aparición de la vegetación. De forma que el resultado final mantendrá una aleatoriedad sin perder continuidad, acercándose así al aspecto de la naturaleza.

Distancia a la ruta

En los casos en los que el jugador se mueve por una ruta predefinida, los elementos naturales que estén alejados no se verán con detalle, por lo que no será necesario colocar gran densidad de estos elementos. Ya que solamente aumentaría el coste sin aportar una mejora a la visualización. Por esta razón, este método da mayor importancia a los puntos cercanos a la ruta y menor a aquellos que por su lejanía o no se ven, o no es necesario que se visualicen con detalle.

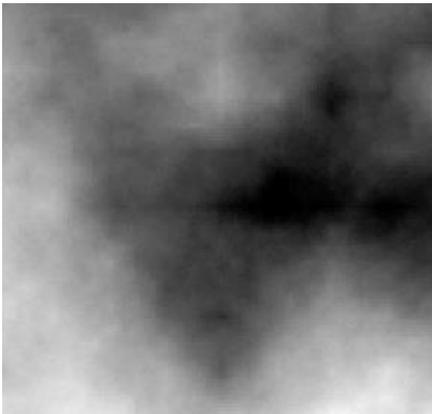


Figura 3: Turbulencia mostrada como una textura.

La posición de la ruta viene dada por una serie de coordenadas GPS consecutivas. En este caso no se ha tenido en cuenta la altura de estos puntos, ya que lo que se desea es representar simplemente la posición. Para poder obtener la probabilidad de colocación de los elementos naturales siguiendo esta idea, se ha tenido que realizar un preprocesado a la ruta, en la que:

Se ha dilatado la ruta, ya que ésta contiene solamente puntos y se quiere que el usuario pueda avanzar por ella sin encontrar ningún obstáculo. Este grosor depende del ancho que se requiere para la ruta final, aunque para este caso simplemente se ha utilizado un ancho que permita el paso.

Para conseguir una probabilidad progresiva, se ha realizado un degradado mediante la interpolación lineal entre los valores de la ruta, que tendrán un valor de 1, y los valores de los bordes del mapa, con valor 0. Para ello, cada punto del mapa calcula su probabilidad según su distancia al punto más cercano de la ruta, obteniendo finalmente el degradado que puede verse en la Figura 4.

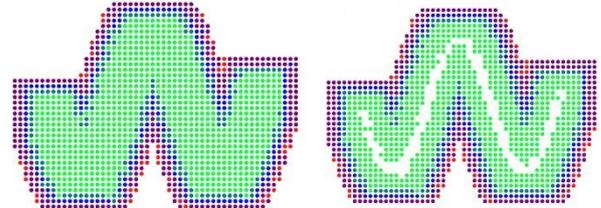


Figura 4: Probabilidad de colocación según la ruta, antes y después de aplicar la máscara de la ruta.

Una vez obtenido este degradado, donde la zona verde indica la mayor densidad y la zona roja hacia donde se va disminuyendo, se utiliza de nuevo la ruta original ampliada, pero esta vez como máscara, para eliminar la aparición de estos elementos en el interior de la ruta.

Obtención de la probabilidad final

Una vez obtenidas todas las probabilidades se deberán juntar en una sola. Para ello, para cada punto del mapa se aplica la ecuación 1, donde se suma la probabilidad de altura, la de inclinación, la de distancia a la ruta y la obtenida por el ruido de Perlin. Al valor obtenido se le aplica un modificador mediante un valor aleatorio, para así proporcionar una mayor variedad.

$$P=(x1*altura+x2*angulo+x3*perlin+x4*ruta)*rand \quad (1)$$

A cada una de las cuatro probabilidades se le aplica un modificador ($x1, \dots, x4$). Este modificador permite que se pueda elegir que probabilidad ha de tener más importancia, teniendo en cuenta que la suma de las 4 debe dar un valor normalizado entre 0 y 1, por lo que inicialmente cada modificador tendrá un valor de 0.25.

En la Figura 5 puede verse el resultado final después de obtener todas las probabilidades y aplicar la máscara de la ruta. En este caso, la importancia se le ha dado a la ruta, utilizando un modificador de 0.4 para la ruta y 0.2 para el resto.

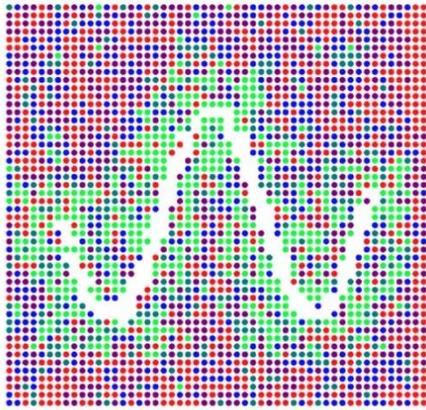


Figura 5: Probabilidad de colocación al aplicar todos los factores.

Con la rejilla obtenida de las probabilidades de colocación para cada punto, el siguiente paso es seleccionar el valor de corte para colocar o no elemento. En la Figura 6 se pueden ver dos opciones, un límite de corte bajo y uno alto.

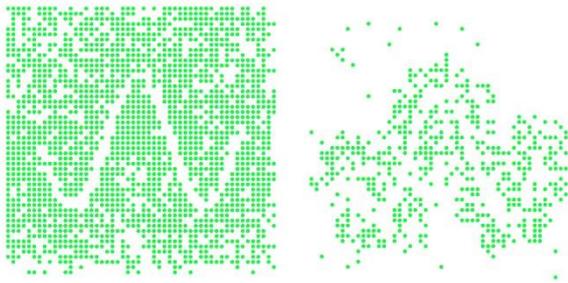


Figura 6: Dos niveles de límite de corte en la probabilidad de colocación.

Desviación de la posición

En la figura 6 se aprecia que el resultado es completamente regular lo cual es poco realista. Por ello, para introducir la aleatoriedad presente en la naturaleza, el método realiza una desviación de la posición.

Esta desviación modifica las coordenadas XY de los elementos naturales a colocar. Esta desviación se obtiene mediante un valor aleatorio, que nunca será mayor que el espaciado mínimo que requiere cada elemento natural, para así evitar que dos elementos puedan superponerse. Es decir, la desviación para cada elemento será un valor entre 0 y la distancia mínima que requiera el elemento natural. El resultado final de la distribución puede verse en la **Figura 67**.

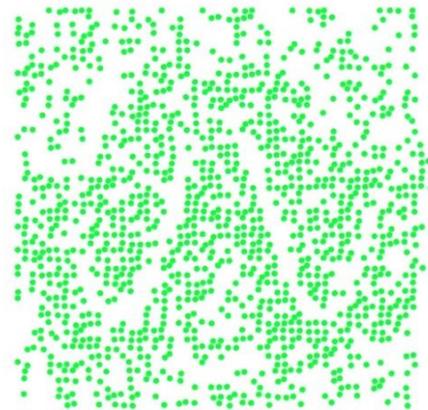


Figura 7: Colocación de elementos naturales con límite de corte medio y con la desviación aplicada.

3.2. Selección de especies naturales

Una vez se tiene la probabilidad de distribución se ha de definir qué especie se debe colocar en cada punto. Para ello, con la intención de conseguir el realismo necesario, se ha de seguir la aleatoriedad de la naturaleza, pero manteniendo la continuidad. Es decir, al añadir una especie en un punto, esta debe influir en las que le rodean. Por lo tanto, para poder cumplir con este objetivo el método vuelve a utilizar el método de ruido de Perlin, ya que permite una distribución de los elementos de forma pseudo-aleatorio sin perder continuidad.

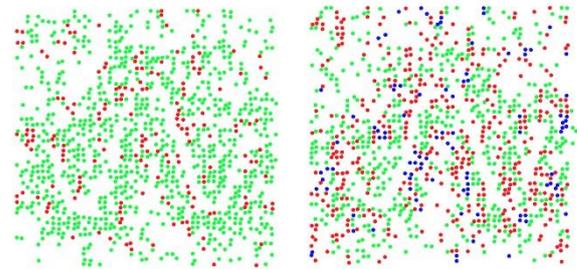


Figura 8: Colocación de varias especies, representadas mediante colores distintos. Izquierda: Dos especies. Derecha: tres especies.

Para ello, se genera una rejilla de puntos, donde al aplicar ruido, se obtiene para cada punto un valor entre 0 y 1. Según la probabilidad de aparición que se le quiera dar a cada especie, se le dará un rango. Con lo que se colocará la especie en cada punto correspondiente según dicho valor. En la Figura 8 pueden verse dos rejillas de colocación con diferente rango entre especies, la primera con dos especies y la segunda con tres.

3.3. Múltiples niveles de vegetación

Hasta ahora, se ha considerado que las especies vegetales utilizadas tienen todas el mismo espaciado. Pero en un entorno natural no siempre es así, sino que habrá diferente espaciado entre ellas. Por ejemplo, entre un árbol y una planta. Por ello, en este caso, el método agrupa todos los elementos en diferentes niveles, según su espaciado.

Para cada nivel se obtiene la rejilla de puntos con la distribución y especie seleccionada. Una vez hecho con todos, estos se unen en uno solo, dando mayor importancia al nivel con elementos con mayor espaciado. De forma que el segundo nivel solo añadirá el elemento en caso de que no interfiera con el primer nivel y así hasta llegar al último.

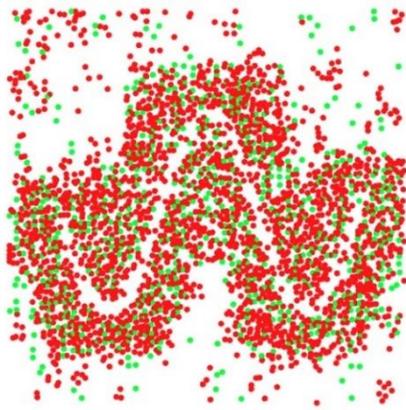


Figura 9: Colocación de dos niveles, uno con mayor espaciado, representando árboles (verde) y otro con menor, representando plantas (rojo).

La colocación final puede verse en la Figura 9, donde se han utilizado dos niveles de vegetación, con diferente espaciado. En la figura, cada nivel está representado con un color para poder diferenciarlos y en la Figura 10 puede verse el resultado final. Hay que tener en cuenta en ambas figuras, que al nivel que corresponde a plantas se le ha dado una menor restricción, de forma que pueden aparecer en el camino.



Figura 10: Resultado final con dos niveles: Árboles y plantas.

4. Visualización

En esta sección se presentan los métodos de visualización utilizados para mostrar los resultados. El modelo propuesto se ha implementado en el motor de juegos UNITY3D (<https://unity3d.com>), por lo que todos los resultados mostrados se han visualizado utilizando dicha herramienta.

4.1. Elementos utilizados

Para la visualización del resultado final, se han utilizado los elementos del plugin Landscape Auto material, tales como las texturas y los elementos naturales, más concretamente, diferentes árboles, plantas y piedras. Además, para mejorar la visualización y el realismo se han añadido otros elementos como viento, niebla y el efecto del sol.

4.2. Texturizado

El texturizado se ha incluido en el método, de forma que depende de la altura del terreno y de su inclinación. De forma que en las inclinaciones con un elevado ángulo se han utilizado texturas de piedra, en cambio para inclinaciones con un ángulo bajo, se han utilizado texturas de hierba. Para evitar los cambios bruscos, en los puntos intermedios se realiza una interpolación entre las dos texturas, para obtener el color resultante.

La textura de la ruta se coloca utilizando la máscara de la ruta. En este caso, igual que antes se utiliza una interpolación de color para conseguir un degradado entre la unión de dos texturas.

4.3. Nivel de detalle (LOD)

Debido a la densidad y el tamaño del entorno natural completo, no es posible visualizarlo por completo a un alto nivel de detalle a un bajo coste, debido a la alta complejidad de la geometría utilizada. Por ello, es necesario reducir la cantidad de polígonos que se muestran y para ello se ha utilizado la técnica de varios niveles de detalle (LOD).

Para aquellos elementos que utilizan una gran cantidad de polígonos se han utilizado diferentes niveles de detalle discretos, que modifica el número de polígonos según la proximidad con el punto de vista. En el caso de los árboles, se han utilizado tres niveles: Si está demasiado cerca, el árbol se muestra casi completo, pero se eliminan las ramas bajas para no dificultar la visibilidad, al alejarse un poco se dibuja por completo y al alejarse se visualiza como un impostor, es decir, uno o varios polígonos a los que se les pega una textura con la imagen del árbol. Para otros elementos, como las plantas o las piedras, el número de niveles de detalle se reduce a dos, el elemento completo y el impostor. Una vez estos elementos están demasiado lejos, desaparecen (detail culling).

5. Resultados

En esta sección se van a estudiar los resultados obtenidos en un equipo Intel Xeon E5 v2 3.70GHz, al aplicar el método a diferentes mapas de alturas con diferentes rutas. El estudio se ha realizado bajo los aspectos de eficiencia y realismo.

5.1. Eficiencia

Para ver la eficiencia del método, se ha aplicado a dos modelos de terreno distintos y se han comparado los resultados con el obtenido en los mismos modelos de terreno sin aplicar la restricción de la distancia a la ruta. En la Figura 11 puede verse la diferencia en la distribución en ambos modelos. Los resultados para las cuatro distribuciones se recogen en la Tabla 1, en la que se ha indicado el número de árboles, plantas y rocas colocados, además del coste de ejecución del método.

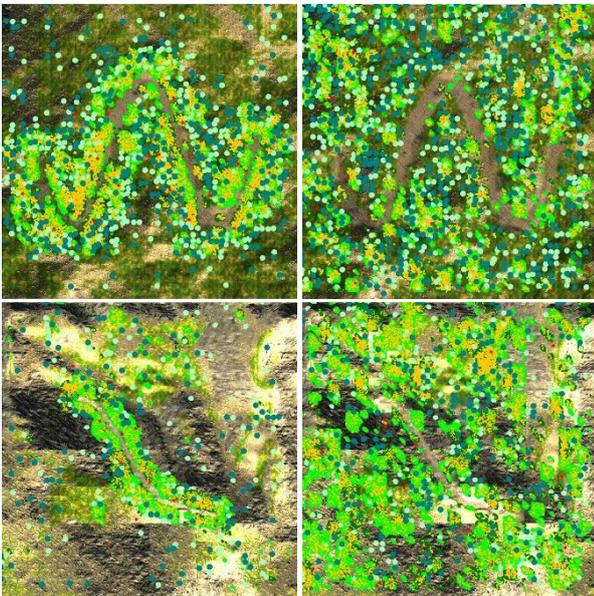


Figura 11: Distribución de los elementos naturales en dos mapas distintos al aplicar el método completo (izq) y al no usar la restricción de distancia a la ruta (der).

Mapa	árboles y rocas	Plantas	Coste(s)
Onda (izq)	621	145561	10.13
Onda (der)	867	206038	11.23
Recto (izq)	262	60045	6.62
Recto (der)	374	201673	11.12

Tabla 1: Coste y número de elementos para las cuatro distribuciones de la Figura 11.

Por otro lado, se ha realizado un recorrido de 10 segundos por la ruta y se ha recogido el número de triángulos y FPS en cada segundo. Los resultados se muestran en la Figura 12.

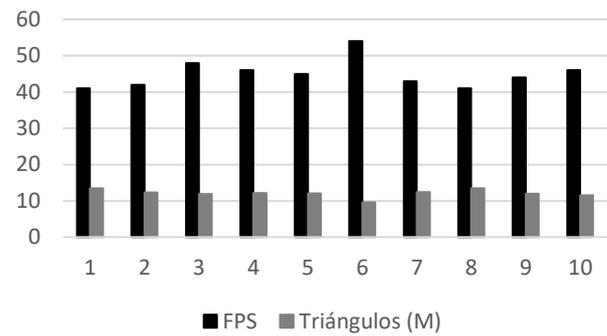


Figura 12: Rendimiento en una ejecución de 10 segundos, donde se muestra los FPS obtenidos en cada segundo y el número de triángulos (en millones) visualizados.

5.2. Realismo

Para poder comprobar el resultado obtenido del método y su realismo, se han realizado varias capturas en diferentes puntos de la ruta, mostradas en la Figura 13.

6. Conclusiones

Este trabajo presenta un método para generar un entorno natural de forma procedural, que incluye nivel de detalle para terrenos con rutas.

Los resultados obtenidos cumplen los objetivos iniciales. Las pruebas realizadas muestran que nuestro método, es capaz de generar un entorno natural de forma automática, que concentra el mayor nivel de detalle en la ruta donde pasará el usuario. Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados en el rendimiento, se puede ver que las restricciones aplicadas reducen el coste y la cantidad de elementos dibujados sin que el resultado final se vea afectado, además, con una media de 12 millones de triángulos y 45 FPS, considerando que la escena tiene aplicados efectos, tales como viento y que se ha utilizado una alta calidad en todos los aspectos, se puede concluir que el método, además, es eficiente.

En el futuro, se quiere investigar la selección de especies con más restricciones a parte de la altura, inclinación y espaciado mínimo, de forma que cada especie tenga sus características. A partir de ello, el método podrá elegir las teniendo en cuenta el tipo de ecosistema que se quiere simular. Por otro lado, el método genera el entorno natural a partir de todos los elementos que tiene disponibles, así que, además de ello, se quiere que sea capaz de generar entornos naturales según el tipo de ecosistema que se quiera simular.



Figura 13: Capturas de pantalla obtenidas al ejecutar el método sobre el motor de juegos, Unity3D.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido respaldado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Project TIN2013-47276-C6-6-R y TIN2016-75866-C3-1-R), el Plan de promoción de la investigación de la UJI (P11B2014-37) y Fundación Feder y la Generalidad Valenciana Valenciana (Project PROMETEO/2010/028).

8. Referencias

[AD06] ALSWEIS, M., AND DEUSSEN, O. 2006. Wang-tiles for the simulation and visualization of plant competition. In *Advances in Computer Graphics*, vol. 4035 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 1–11.

[ACV*] Andújar, C., Chica, A., Vico, M. A., Moya, S., Brunet, P. 2014. *PereComputer Graphics Forum*, Vol. 33, Num. 6, pp 101–117.

[Chn10] CHNG, E. 2010. An artificial life-based vegetation modelling approach for biodiversity research. *Green Technologies: Concepts, Methodologies, Tools and Applications*, 417.

[DHL*98] DEUSSEN, O., HANRAHAN, P., LINTERMANN, B., MECH, R., PHARR, M., AND PRUSINKIEWICZ, P. 1998. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer Graphics and Interactive techniques*, ACM, 275–286.

[GCR*16] GASCH C., CHOVER M., REMOLAR I., REBOLLO C.: *Procedural Modeling of Terrain from GPS Routes. XXVI Spanish Computer Graphics Conference (2016)*.

[Ham01] HAMMES, J. 2001. Modeling of ecosystems as a data source for real-time terrain rendering. In *Digital Earth Moving*. Springer, 98–111.

[HHS02] HARGROVE, W. W., HOFFMAN, F. M., AND SCHWARTZ, P. M. 2002. A fractal landscape realizer for generating synthetic maps. *Conservation Ecology* 6, 1, 2.

[LP02] LANE, B., AND PRUSINKIEWICZ, P. 2002. Generating spatial distributions for multilevel models of plant communities. In *Proceedings of Graphics Interface*, 69–80.

[OBR*15] ONRUST, B., BIDARRA, R., ROOSEBOOM, R. AND VAN DE KOPPEL, J. 2015. Procedural generation and

interactive web visualization of natural environments. *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*, 133-141.

[Per85] PERLIN K.: An Image Synthesizer. In *SIGGRAPH '85: Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* 19 (1985), 287–296.

[RvdK08] RIETKERK, M., AND VAN DE KOPPEL, J. 2008. Regular pattern formation in real ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 23, 3, 169–175.

[Sch14] SCHWARZ, C. 2014. Implications of biogeomorphic feedbacks on tidal landscape development. PhD thesis, Radboud University Nijmegen.

[SM00] SAURA, S., AND MARTÍNEZ-MILLAN, J. 2000. Landscape patterns simulation with a modified random clusters method. *Landscape ecology* 15, 7, 661–678.

[STB*14] SMELIK, R. M., TUTENEL, T., BIDARRA, R., AND BENES, B. 2014. A survey on procedural modelling for virtual worlds. In *Computer Graphics Forum*, vol. 33, 31–50.

[TBvdK*07] TEMMERMAN, S., BOUMA, T., VAN DE KOPPEL, J., VAN DER WAL, D., DE VRIES, M., AND HERMAN, P. 2007. Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology* 35, 7, 631–634.

[WHD*13] WEIER, M., HINKENJANN, A., DEMME, G., AND SLUSALLEK, P. 2013. Generating and rendering large scale tiled plant populations. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting* 10, 1.