

# Cloud Rendering

## Novas técnicas de *Cloud Rendering*

Mariana Lino Lopes Costa

Departamento de Informática

Universidade do Minho

Braga

a78824@alunos.uminho.pt

### RESUMO

A renderização de nuvens e elementos da atmosfera ainda constituem um grande desafio para a sua representação na computação gráfica. Este artigo descreve uma das técnicas usadas nos dias de hoje para implementar nuvens da forma mais realista possível. A renderização de nuvens é usada principalmente nas áreas de filme e jogos, e tem evoluído ao longo dos últimos anos de forma a aproximar as imagens da realidade.

### KEYWORDS

nuvens, *cloud rendering*, técnicas de renderização, computação gráfica

## 1 Introdução

A maior parte da informação que uma pessoa recebe é por meio de um canal de comunicação visual. Por isso, certamente que a visualização se tornou a maneira mais poderosa e eficaz de representar dados. A área que trata de maior parte dos aspetos visuais nas novas tecnologias é a computação gráfica. Está destinada à geração de imagens em geral, na forma de representação de dados e informação, ou na forma de recriação do mundo real. Pode possuir uma infinidade de aplicações para diversas áreas, desde a própria informática, ao produzir interfaces gráficas para software, sistemas operativos e sites na internet, bem como produzir animações e jogos.

Nas duas últimas décadas, houve um grande avanço na tecnologia, principalmente na visualização científica. No entanto, atualmente ainda existem alguns desafios nesta área, entre eles, a renderização de nuvens realistas e do ambiente meteorológico. Isto é aplicado a jogos de computador, simuladores de voo, entre outras aplicações. Para resolver este problema, este artigo não só apresenta uma implementação e diferentes técnicas utilizadas nos dias de hoje para criar nuvens gráficas, como também a avaliação de desempenho dos seus resultados.

Na secção 2 do artigo fala-se e tenta-se perceber toda a física das nuvens, uma vez que é sempre necessário conhecer os fenómenos naturais para posteriormente os adaptar na computação gráfica. Na secção 3 mostra-se uma técnica implementada para nuvens volumétricas. Na secção 4 são apresentadas as conclusões.

## 2 Física e nuvens

É necessário entender e estudar bem toda a natureza, o céu e a fisiologia das nuvens, antes de se implementar ou elaborar uma tentativa de renderização das mesmas.

Modelar nuvens, sem seguir e levar em consideração o seu comportamento físico, não vai trazer resultados tão realistas e convincentes.

Esta secção fornece uma introdução aos diferentes tipos de nuvens e como eles são nomeados, abrange também comportamento, propriedades físicas e simplificações feitas para modelar nuvens.

### 2.1 Tipos e comportamento

O nosso planeta é envolvido pela atmosfera, uma variedade de gases. O calor do sol atinge a superfície do planeta Terra, provocando a evaporação da água, proveniente dos mares, rios, lagos e florestas. Como o ar quente (vapor) é mais leve, sobe até à atmosfera. A nuvem é formada por meio da transformação do vapor em pequenas gotas de água ou cristais de gelo. Isso explica a grande quantidade de nuvens nos dias de maior calor, pois favorece o aumento da evaporação. O vapor de água é invisível ao olho humano até a água condensar e consequentemente ocorrer a formação da nuvem.

O vento é um fator também indispensável na geração de nuvens, é uma força que pode colocar na nuvem pressões diferentes dependendo da parte da atmosfera onde se encontram. As nuvens podem então ter diferentes direções de vento em diferentes altitudes.

As nuvens exibem uma enorme variedade de tipos, diferindo de acordo com os seguintes atributos [4]:

1. **Tamanho:** As nuvens residem na troposfera, camada acima da superfície da terra, alcançando alturas de 9 a 22 km. Nas latitudes médias, as nuvens mostram uma extensão vertical máxima de 12 a 15 km e de extensão horizontal algumas alcançam algumas centenas de metros e há nuvens conectadas que podem abranger milhares de quilómetros.
2. **Geometria:** Em relação ao raio da Terra (6271 km), a troposfera representa uma concha esférica rasa. A curvatura da Terra produz o horizonte e é diretamente visível ao visualizar nuvens na perspectiva do espaço. As nuvens geralmente se desenvolvem em determinadas alturas e

formam camadas. Eles consistem em *patches* de nuvens ou criam folhas de nuvens nubladas

3. **Aparência do limite:** A aparência das nuvens depende principalmente dos constituintes do volume da nuvem: gotículas de diferentes tamanhos ou partículas de gelo. Enquanto grandes gotículas de água produzem um limite determinado de superfície, as menores criam um limite difuso ou fractal. Partículas de gelo geralmente formam nuvens semelhantes a cabelos ou fibras. A aparência de uma nuvem é fortemente influenciada pela distância do observador: enquanto as nuvens distantes geralmente mostram uma superfície distinta e contornos nítidos, um olhar mais atento revela estruturas difusas ou fractais.
4. **Fenômenos óticos:** As nuvens, como já foi referido anteriormente, consistem em gotas de água e cristais de gelo que dispersam a luz, independentemente do comprimento de onda. As nuvens são maioritariamente das vezes, brancas. As cores espectrais aparecem apenas em certas constelações angulares, mas geralmente não influenciam a sua aparência no geral. No entanto, vários fenômenos óticos determinam a sua aparência natural característica:
5. **Auto-sombreamento:** A atenuação da luz dentro de uma nuvem cria tons de cinza e é proporcional à profundidade ótica do volume. O auto-sombreamento fornece a sugestão para perceber as nuvens como objetos volumétricos.
6. **Dispersão múltipla:** Atenua levemente o efeito de auto-sombreamento, distribuindo a luz dentro do volume da nuvem em um processo semelhante à difusão [1,11,12].
7. **Sombras entre as nuvens:** As nuvens projetam sombras sobre outras nuvens.
8. **Sombra da Terra:** As nuvens podem ser sombreadas pela Terra.
9. **Iluminação indireta:** A inter-reflexão da luz, entre nuvens diferentes ou entre partes diferentes da mesma nuvem, ilumina essas regiões [13].
10. **Armadilhas leves:** A inter-reflexão da luz em menor escala ocorre em determinadas superfícies de nuvens e permite que as concavidades pareçam mais brilhantes.
11. **Corona:** O efeito corona ocorre quando a nuvem é iluminada por trás. A forte dispersão para frente no limite produz uma silhueta brilhante (exemplo: revestimento prateado).
12. **Dispersão atmosférica:** As nuvens geralmente aparecem em cores vivas. Isso é causado pela dispersão da luz fora do volume das nuvens nas moléculas de ar e nos aerossóis. As nuvens são, portanto, frequentemente iluminadas pela luz do sol amarelada e avermelhada. Diferentes caminhos de luz na atmosfera deixam as nuvens altas parecerem brancas e as nuvens baixas amarelas. A dispersão atmosférica também cria claraboia azul que, em algumas situações, representa a principal fonte de iluminação
13. **Inter-reflexão do solo:** Para nuvens de baixo nível, a inter-reflexão com o solo cria tons subtis, dependendo do tipo de solo [14].

A nuvem pode então aparecer em diversas formas e variações. A maioria dos tipos são nomeados após uma combinação dos atributos supracitados [2].

Uma característica que diferencia os diferentes tipos de nuvens é a altitude a que se formam. É importante referir que esta altitude varia conforme a posição geográfica (latitudinal) da região considerada.



Figura 1: Nuvem Cumulus (1), Nuvem Congestus (2), Nuvem Cumulonimbus (3), Nuvem Stratocumulus (4) e Nuvem Status (5).

Existem cinco denominações para os tipos de nuvens que se encontram no estágio baixo, a 2 km da superfície (Figura 1):

1. *Cumulus*: nuvens isoladas que apresentam uma base horizontal, contornos bem definidos, cor bem branca quando iluminada pelo sol, constituídas principalmente por gotículas de águas, podem conter cristais de gelo no topo, costumam ter uma aparência inchada;
2. *Congestus*: nuvens com bordas protuberantes no topo e com um considerável desenvolvimento vertical, indica profunda instabilidade e favorecimento por escoamento ciclónico em altitude.
3. *Cumulonimbus*: Com grande desenvolvimento vertical apresenta a forma de uma montanha e sua forma só pode ser vista de longe devido ao seu enorme tamanho. No topo, geralmente apresenta a forma característica de uma bigorna. É uma nuvem mais escura formada por grande gotas de água e granizo, podendo conter cristais de gelo no seu topo.
4. *Stratocumulus*: Nuvens cinzentas ou esbranquiçadas, é formada por gotículas de água e estão associadas a chuvas fracas.
5. *Stratus*: Nuvem cinzenta forte com base uniforme, costuma encobrir o sol e a lua.

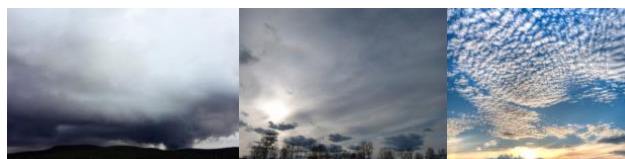


Figura 2: Nuvem Nimbostratus (1), Nuvem Altostratus (2), Nuvem Altocumulus (3).

Há três denominações para as nuvens situadas em estágio médio, de 2 a 8 km em latitude tropical, 2 a 7 km em região temperada e 2 a 4 km na região polar (Figura 2):

1. *Nimbostratus*: Nuvem de cor bastante escura e de grande extensão e base difusa formadas por gotas de chuva.

## Cloud Rendering

2. Altostratus: Assemelham-se a um lençol cinzento, sempre tem partes finas que permitem ver o sol.
3. Altocumulus: Nuvem cinza (por vezes branca) que apresenta sombras próprias e tem a forma de rolos ou lâminas fibrosas ou difusas.



Figura 3: Nuvem Cirrus (1), Nuvem Cirrocumulus (2), Nuvem Cirrostratus (3).

Por fim, existem três denominações para formações de nuvens em estágios altos, ou seja, de 6 a 18 km na região tropical, 5 a 14 km na região temperada e 3 a 8 km na região polar (Figura 3):

1. *Cirrus*: Nuvens com brilho sedoso, isoladas e formadas por cristais de gelo parecendo convergir para o horizonte.
2. *Cirrocumulus*: Nuvens braças compostas quase exclusivamente por cristais de gelo agrupados em grânulos semi-transparentes.
3. *Cirrostratus*: Nuvens parecidas com um véu transparente.

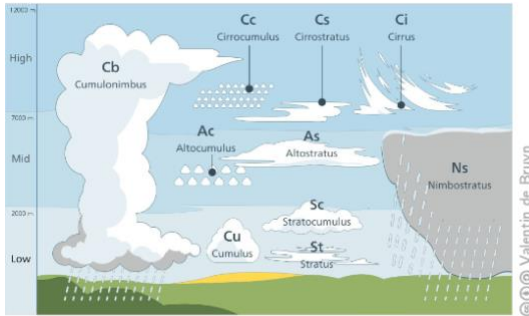


Figura 4: Breve representação dos tipos de nuvem, Ilustração por valentin de Bruyn.

Uma representação dos diversos tipos de nuvens é mostrada na Figura 4.

## 2.2 Iluminação nas nuvens

A nuvem insere-se num meio que provoca a atenuação e dispersão da luz. Nesta subsecção é apresentada a terminologia para fornecer uma breve introdução às técnicas de medição de radiação eletromagnética.

A luz viaja através das nuvens, na qual os fótons interagem com partículas que os podem absorver ou espalhar, causando a mudança no brilho.

O brilho altera-se devido a um destes quatro fatores: absorção, dispersão para dentro ou interna, dispersão para fora ou externa, e emissão, como estão representados na Figura 5 por *absorption*, *in-scattering*, *out-scattering* e *emission*, respetivamente [3].

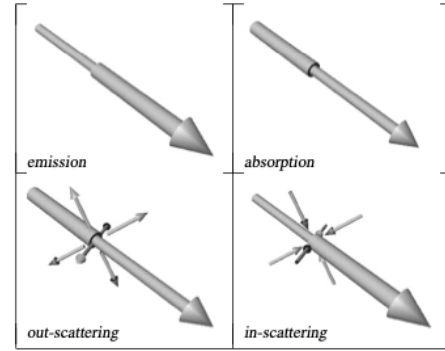


Figura 5: Fatores para o brilho.

### 2.2.1 Absorção

A luz pode ser absorvida na nuvem. O coeficiente de absorção é a probabilidade de um fóton ser absorvido. Quando isto ocorre, há uma mudança no brilho, transformando a luz em calor. A absorção é, então, o processo de transformação da radiação em calor. A atenuação de um raio de luz com a radiância  $L$  e direção  $\vec{\omega}$  na posição  $x$  é descrita por:

$$(\vec{\omega} \cdot \nabla)L(x, \vec{\omega}) = -\kappa_a(x)L(x, \vec{\omega}).$$

Na atmosfera, a absorção ocorre devido principalmente ao vapor de água e aerossóis. Nuvens mais finas podem absorver consideravelmente menos luz. As nuvens de chuva são geralmente mais escuras porque absorvem mais luz. Isso ocorre porque essas nuvens têm uma presença maior de gotículas de água, e consequentemente há eficácia na absorção de luz.

### 2.2.2 Dispersão

A dispersão é o processo em que o brilho é absorvido e reemitido em outras direções.

#### 2.2.2.1 Dispersão interna

A dispersão interna refere-se à dispersão da luz na direção  $\vec{\omega}$  de todas as direções no ponto  $x$ :

$$(\vec{\omega} \cdot \nabla)L(x, \vec{\omega}) = \frac{\kappa_s(x)}{4\pi} \int_{4\pi} p(\vec{\omega}', \vec{\omega})L(x, \vec{\omega}')d\omega',$$

A luz atrás das nuvens tem a possibilidade de atravessar e sair da nuvem em relação à vista. É isso que destaca as bordas das nuvens quando se olha para o sol. Esse efeito costuma ser chamada de revestimento prata (Figura 6).



Credit: taniadelongchamp @ Pixabay

Figura 6: *In-scatter (Dispersão interna)* criando o revestimento prata.

#### 2.2.2.2 Dispersão externa

A dispersão para fora refere-se à atenuação da radiação ao longo da direção  $\vec{\omega}$  devido à dispersão em outras direções:

$$(\vec{\omega} \cdot \nabla)L(x, \vec{\omega}) = -\kappa_s(x)L(x, \vec{\omega}).$$

A luz pode se recuperar e sair das nuvens na direção oposta. Como se pode observar na Figura 7, a dispersão para fora das nuvens tende a criar arestas mais escuras, destacando as formas onduladas.



Credit: WolfBlur @ Pixabay

Figura 7: *Out-scatter (Dispersão externa)* refletindo de volta e destacando as bordas escuras das nuvens.

#### 2.2.2.3 Extinção

É o efeito líquido da atenuação da luz devido à absorção e dispersão descrita pelo coeficiente de extinção:

$$\kappa_t = \kappa_a + \kappa_s.$$

#### 2.2.4 Emissão

Contribui com luz para um raio:

$$(\vec{\omega} \cdot \nabla)L(x, \vec{\omega}) = \kappa_a(x)L_e(x, \vec{\omega}).$$

Geralmente não é relevante para a renderização de nuvens, pois as nuvens não emitem luz.

#### 2.2.5 Equação de Transferência Radiativa (RTE)

Ao combinar todas as equações das quatro maneiras pelas quais a luz pode interagir com os meios em que se insere, gera-se o RTE que descreve a mudança de brilho (irradiação) no ponto  $x$ :

$$\begin{aligned} (\vec{\omega} \cdot \nabla)L(x, \vec{\omega}) &= \kappa_a(x)L_e(x, \vec{\omega}) + \\ &\frac{\kappa_s(x)}{4\pi} \int_{4\pi} p(\vec{\omega}', \vec{\omega})L(x, \vec{\omega}')d\omega' - \\ &\kappa_a(x)L(x, \vec{\omega}) - \kappa_s(x)L(x, \vec{\omega}). \end{aligned}$$

## 2.3 Evolução das nuvens nos jogos

Os videojogos estão a se tornar cada vez mais exigentes em termos de qualidade visual e dinamismo.

Jogos de mundo aberto exigem muitos elementos dinâmicos, como iluminação do dia e clima em evolução em tempo real. Céu, atmosfera e nuvens são os três principais componentes que precisam de se simular para alcançar a hora do dia dinâmica e as condições climáticas. Eles são bastante difíceis de renderizar devido à sua natureza volumétrica muito detalhada e específica.

Na Figura 8 é possível observar-se a evolução das nuvens nos jogos ao longo dos últimos 10 anos, em que nos primeiros jogos 3D utilizavam visivelmente uma imagem 2D para representar as nuvens, e o céu ficava muito pouco realista e convincente. E nos jogos mais recentes como o GTA V (parte inferior da figura) as nuvens aproximam-se claramente da realidade.



Figura 8: Evolução da renderização de nuvens nos videojogos.

Uma implementação comum de renderização de nuvens em jogos de computador baseia-se em se ter uma biblioteca de imagens em



## Cloud Rendering

nuvem armazenadas. Esta é uma solução que pode ser visualmente agradável, mas que tem várias desvantagens. Se a biblioteca armazenar apenas uma imagem por nuvem, a ilusão de que o céu contém nuvens reais é devastada quando o jogador começa a mover-se, e ainda piora quanto mais ele se desloca. Esse problema poderia ser facilmente resolvido armazenando várias imagens diferentes ângulos e apresentando-as à medida que o reprodutor se move. No entanto, devido ao facto de ter que armazenar várias imagens (possivelmente de alta resolução), as imagens rapidamente começam a usar uma grande quantidade de espaço de armazenamento. O problema de armazenamento piora se a solução apresentar muitas variações e tipos de nuvens diferentes. O facto desta solução se basear numa imagem 2D também pode fracassar ao tentar alterar a cobertura da nuvem, deve levar ao surgimento e à construção de novas nuvens.

Uma solução eficaz e com potencial para estes problemas é passar de uma imagem 2D para uma imagem 3D. Uma maneira de visualizar as nuvens em 3D é primeiramente renderizá-las volumetricamente, que geralmente envolve um algoritmo que percorre incrementalmente um volume, mostra densidade e calcula a iluminação.

Quando surgiram os primeiros jogos e durante muito tempo, as nuvens volumétricas eram vistas como computacionalmente pesadas para serem implementadas nos jogos. Não havia hardware desenvolvido para possibilitar a sua criação. No entanto, nos últimos anos houve uma evolução drástica no hardware do consumidor atual (*Xbox One*, *Playstation4*).

Posteriormente, na secção 3, irá ser explicada uma das técnicas de renderização de nuvens volumétricas.

### 2.4 Desafios na computação gráfica

Uma visualização realista das nuvens requer que a computação gráfica enfrente alguns desafios como [4]:

1. Heterogeneidade: no mundo real, como mencionado anteriormente, existe uma imensidão de tipos de nuvens, uma coleção muito heterogênea de aparências de nuvens, tamanhos e formas.
2. Dispersão atmosférica: para criar a aparência natural de uma nuvem, o modelo de iluminação empregado deve reproduzir os seus fenómenos óticos típicos, incluindo a dispersão atmosférica (mencionada na secção 2.2), que é a principal fonte de cor no céu. Isso requer a inclusão de modelos atmosféricos no processo de iluminação das nuvens.
3. Volume Curvo: a atmosfera esférica dificulta a vantagem dos volumes alinhados por eixo se as nuvens forem vistas em uma escala grande ou até global.
4. Grande Domínio: o tamanho do volume do conjunto das nuvens no mundo especial, principalmente quando é visto de cima, requer técnicas sofisticadas e eficientes de iluminação e renderização.

## 3 Novas técnicas de renderização de nuvens

As técnicas para renderizar nuvens são uma área bastante pesquisada, com imensas novidades e ideias recentes para solucionar o problema.

Nesta secção são brevemente descritas algumas das variadas técnicas implementadas recentemente para a renderização de nuvens aproximadas da realidade e também a discussão dos seus resultados.

### 3.1 Técnica atual para nuvens baixas

Em 2016, Rurik Högfeldt [5] do departamento de Ciência da Computação e Engenharia da Universidade de Tecnologia de Gothenburg na Suécia criou a técnica de renderização de nuvens realistas e convincentes em tempo real implementada no mecanismo de jogo, *Frostbite*.

O *Frostbite* [6] é um motor gráfico de jogo desenvolvido pela EA *Digital Illusions* CE, criadora da série *Battlefield*, que utiliza a tecnologia a fim de criar jogos de alta tecnologia.

A técnica foi focada em renderizar nuvens densas perto do visualizador, enquanto a ainda suporta o antigo sistema de nuvens de alta altitude. A nova técnica utilizou marchas de raios e uma combinação de ruídos de Perlin e Worley. As nuvens são projetadas em uma cúpula para simular a forma da atmosfera de um planeta. A técnica tem a capacidade de renderizar de variados pontos de vista e as nuvens podem ser vistas de baixo, dentro e acima da atmosfera. A renderização final é capaz de renderizar céus bastantes realistas com muitas formas diferentes de nuvens em diferentes altitudes e com iluminação completamente dinâmica.

Esta recente técnica foi baseada em técnicas anteriores e teve como objetivo melhorar o desempenho de renderização de nuvens no *Frostbite* que estava implementado anteriormente.

#### 3.1.1. Implementação

O *Frostbite* tem diferentes modelos de céu que podem ser renderizados. Esta implementação foi focada no modelo *Sky Physical*. Na implementação anterior, as nuvens foram renderizadas, aplicando texturas estáticas chamadas de camadas panorâmicas de nuvens. Esta técnica resultava para as nuvens distantes, contudo as nuvens próximas pareciam planas.

A solução foi criar um modelo de nuvem que é renderizado para uma textura que é fornecida posteriormente ao módulo do céu. Essa textura é renderizada uma vez para cada quadro, fornecendo uma solução dinâmica para renderização de nuvens. O antigo sistema pode-se manter para as nuvens que estão longe, como se pode ver no esquema da Figura 9.

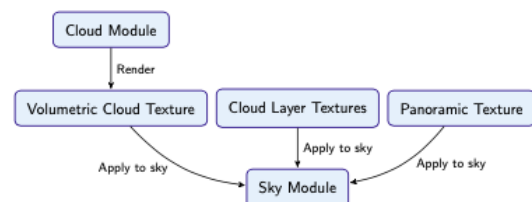


Figura 9: Novo esquema de renderização (retirado de [5]).

Foi criado então um *shader* para usar no módulo de nuvem. Usa a marcha de raios junto com diferentes texturas de ruído para renderizar nuvens volumétricas.

#### 3.1.1.1. Ruídos utilizados

De forma a criar as formas de nuvens, foram combinados dois ruídos já conhecidos, o ruído de Perlin e o de Worley. Houve uma pré-geração desses ruídos em duas texturas tridimensionais que foram utilizadas no *shader*.

Em 1985, Ken Perlin apresentou uma técnica para gerar ruído com aparência natural [7]. Essa técnica tem sido utilizada gerando ruído para muitos fenômenos naturais, incluindo as nuvens. Geraram uma textura tridimensional de ladrilhos usando um programa desenvolvido por Stefan Gustavson [8] (Figura 10).

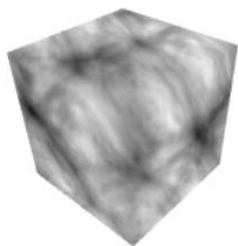


Figura 10: Ladrilho 3D com o ruído *Perlin* aplicado ao cubo (retirado de [5]).

Em 1996, Stewen Worley introduziu um ruído celular, descreveu uma técnica para a geração desse ruído, como está demonstrado na Figura 11.

Usou-se esse tipo de ruído para criar nuvens finas e onduladas. Ao inverter o ruído *Worley*, é possível controlar a aparência entre o fio fino e o ondulado e vice-versa. O algoritmo para criar uma textura com esse ruído pode ser bastante simples.

Uma abordagem seria gerar um conjunto de pontos de recurso e em seguida sombrear todos os *texel* pela distância até o ponto de recurso mais próximo. Gerar o ruído desta maneira é lento, então esta abordagem foi otimizada:

1. Subdividir um cubo em células do mesmo tamanho;
2. Para cada célula, colocar aleatoriamente um ponto de recurso dentro dela;
3. Para cada ponto dentro do cubo, colocá-lo pela distância euclidiana até ao ponto de característica mais próximo. Ao envolver as células nas bordas, a textura será inclinável nas três dimensões.

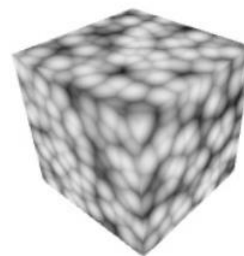


Figure 11: Ladrilho 3D com o ruído *Worley* aplicado ao cubo. (retirado de [5])

#### 3.1.1.2. Texturas

Os ruídos são pré-gerados e armazenados em duas texturas tridimensionais diferentes: *Shape* e *Detail*.

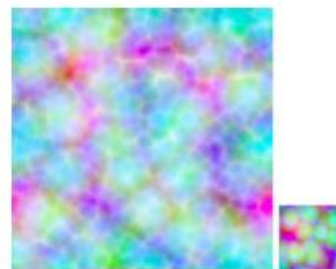


Figura 12: Texturas de nuvem, Esquerda: *Shape*, Direita: *Detail* (retirado de [5]).

A primeira textura (*Shape*) é usada para criar a forma base das nuvens, possui quatro canais, um com ruído de *Perlin* e três com oitavas diferentes de *Worley*.

A segunda textura (*Detail*) é usada para adicionar detalhes e possui apenas três canais com oitavas diferentes de ruído do *Worley*.

#### 3.1.1.3. Texturas Climática

As nuvens são controladas por uma textura bidimensional repetitiva com três canais chamados de texturas climáticas:

1. O canal vermelho controla a densidade da textura, que também pode ser modificada com base na distância do visualizador. Isto aumenta ou diminui a presença de nuvens no horizonte.
2. O canal verde controla a altura das nuvens em que:
  - a. O valor 0 indica que a nuvem não tem altura;
  - b. O valor 1 indica que a nuvem atingiu a altura máxima;
3. O canal azul controla quais nuvens devem aparecer consoante a sua altura.
  - a. O valor 0 produz uma altitude inicial igual ao início da atmosfera
  - b. O valor 1 faz a nuvem aparecer na altitude máxima da cama de nuvens.

## Cloud Rendering

A Figura 13 é um exemplo de uma textura climática usada durante a implementação. O tom amarelo se deve à cobertura e altura com valores semelhantes. O azul que controla a altitude é definido como zero exceto por quatro nuvens diferentes, portanto, as nuvens que usam essa textura climática aparecem em cinco altitudes diferentes.

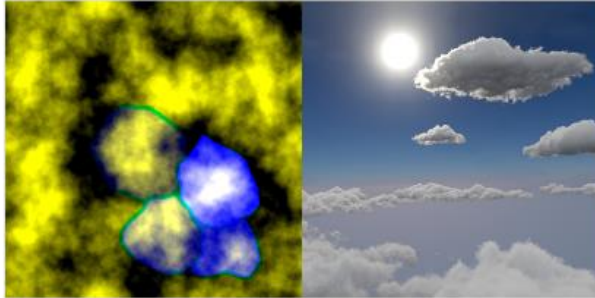


Figura 13: Exemplo de uma textura climática (retirado de [5]).

### 3.1.1.4. Nuvens com Precipitação e Vento

Gotas de água maiores absorvem mais luz, como foi já explicado na Secção 2.2. Como foi assumido um tamanho uniforme de gotícula, não é possível conseguir se alterar apenas o coeficiente de absorção. Gerar precipitação ainda é mais complicado, pois a densidade vai aumentando com a altitude e isso faz com que a parte inferior da nuvem absorva menos que a parte superior, o que é esperado o oposto. As nuvens de chuva gerada são escurecidas por um gradiente que é multiplicado pela contribuição de luz. Com essa simplificação, todas as nuvens podem ter o mesmo coeficiente de absorção enquanto a técnica ainda está sendo capaz de produzir nuvens de chuva e não-chuva.

No mundo real, as nuvens podem se mover em diferentes direções dependendo da sua altitude. Esta técnica foi limitada neste aspeto, pois foi considerada que o vento tinha apenas uma direção. Mas como foi uma evolução da técnica anterior do *Frostbite*, foi possível colocar as nuvens de alta altitude a se mover noutra direção.

### 3.1.1.5. Definição da forma

Esta subsecção aborda como foram definidas as formas das nuvens a partir dos ruídos descritos anteriormente.

**Modificação da densidade:** todas as nuvens são modeladas usando a mesma abordagem e a densidade é independente do local onde a nuvem aparece na atmosfera.

1. O primeiro valor de cobertura da textura climática é usado como densidade inicial.
2. Um sinal de altura coberto é aplicado. Esse sinal de altura diminui a densidade na parte superior e na parte inferior da nuvem.
3. As duas texturas tridimensionais são usadas para corroer a densidade do sinal de altura.
4. É aplicado um gradiente de altura que diminui a densidade na parte inferior.

5. A densidade final antes de qualquer cálculo de iluminação deve estar na faixa  $[0,1]$ . Densidades abaixo de zero são descartadas e densidades superior a 1 são fixadas para aumentar a robustez e tornar a iluminação mais equilibrada.

**Deteção das bordas:** Definir a forma da nuvem só com texturas não é suficiente para se obter uma nuvem detalhada.

Os detalhes mais pequenos de textura são usados para corroer nuvens nas bordas. A erosão é realizada subtraindo o ruído dos detalhes de textura com ruído *Worley*. Ao inverter o ruído, é possível alternar entre bordas finas e onduladas ou usar uma combinação de ambas.

### 3.1.2 Renderização

Esta subsecção descreve toda a ideia de como as nuvens foram renderizadas de acordo com a distribuição de densidade apresentada na secção anterior.

#### 3.1.2.1 Marcha no raio

A marcha com raios é a técnica de renderização volumétrica que foi usada para renderizar estas nuvens.

Todo o cenário é renderizado usando essa técnica para cada marcha de pixel e avaliando a densidade, iluminação e sombra em cada ponto de amostra ao longo do raio.

Quanto mais pontos de amostra, melhor é o resultado, mas é também mais caro e pesado.

Como solução, usaram um tamanho de passo que é a distância do desenho dividida pelo número de passos. A distância de desenho é o valor mínimo da profundidade da atmosfera. O número de passos é determinado pela opção de qualidade e pela profundidade da atmosfera. Isso garante que, mesmo que a atmosfera seja dimensionada para os extremos, a contagem de passos vai ser sempre apropriada.

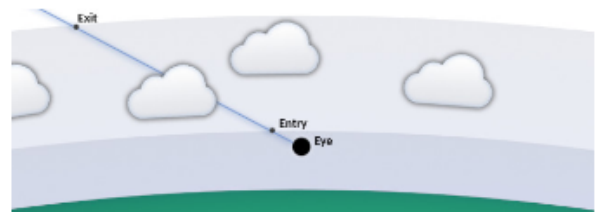


Figura 14: Dependência da atmosfera pela perspectiva (retirado de [5]).

Na Figura 14 consegue-se observar que a profundidade da atmosfera é maior quando se estiver a visualizar o horizonte, no entanto a contagem de passos é constante. As nuvens perto do visualizador estão a um tamanho de passo menor, e consequentemente tem uma melhor qualidade.

### 3.1.2.2 Renderização dentro da atmosfera e no espaço

O algoritmo anterior pode ser aproveitado e facilmente estendido para se renderizar as nuvens a partir de qualquer perspectiva.

1. Caso se esteja no espaço, apenas se vai usar o ponto de saída da Figura 14, como origem. Como não é possível calcular a profundidade da atmosfera usando a distância entre o ponto de saída e o ponto de entrada, usaram uma profundidade de atmosfera fixa para raios que só se cruzam com o limite externo da atmosfera.
2. Quando se está dentro da área da atmosfera, usa-se como ponto de origem, a posição do olho. A profundidade é calculada como a distancia do olho ao ponto de saída.

### 2.1.2.2 Projeção em cúpula e Sinal de Altura

A projeção da cúpula é implementada usando a intersecção raio-esfera. O algoritmo calcula pontos de intersecção de um raio e uma esfera perfeita. Como se sabe, a atmosfera da Terra tem a forma de um esferoide oblato, o raio é maior no equador do que nos polos, mas para simplificar todos os cálculos consideraram a atmosfera como uma esfera perfeita (Figura 15).

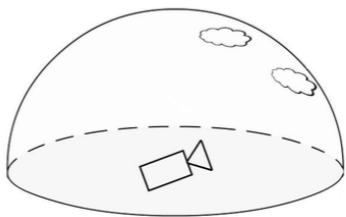


Figura 15: Cúpula de uma esfera perfeita.

O sinal de altura das nuvens é implementado como uma função de parábola (Figura 16). Esta função controla a altitude em que a nuvem aparece e a sua altura real. O valor máximo global do sinal de altura é escalado para sempre ser igual a 1. Ao usar esta função, as nuvens naturalmente passam a obter menos densidade nas bordas inferiores e superiores.

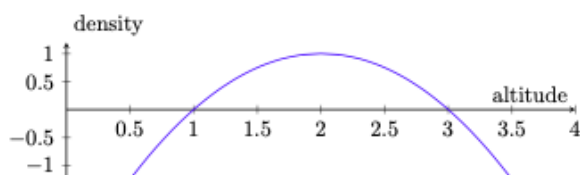


Figura 16: Variação da densidade consoante a altura da nuvem (retirado de [5]).

### 3.1.2.3 Luz, Sombras e Ambiente

A iluminação é avaliada para cada amostra que retornou uma densidade maior que zero quando os raios marcham pela atmosfera. O modelo da iluminação é uma simplificação da função de transferência radiativa, uma vez que não são consideradas as

emissões, como foi visto na secção 2.2, a emissão não é importante, pois no mundo real as nuvens não emitem luz.

Também não foram consideradas superfícies atrás das nuvens.

A transmissão segue as propriedades da lei de Beer-Lambert, conforme descrito na equação seguinte:

$$L(x, \vec{\omega}) = \int_0^s T_r(x, x_t) \underbrace{\sigma_s(x_t) L_i(x_t, -\vec{\omega})}_{S} dt$$

Usou-se um método de integração de espalhamento proposto por Hillaire [9] e é mais estável para altos valores de espalhamento do que técnicas de integração usadas anteriormente.

Uma função de fase descreve a distribuição angular da luz dispersa, é responsável pelo efeito de iluminação das nuvens. Usaram a função de Henyey-Greensteins [10].

O sombreamento de nuvens é implementado por cada etapa dentro de uma nuvem e também em direção ao sol, como mostra na Figura 16.

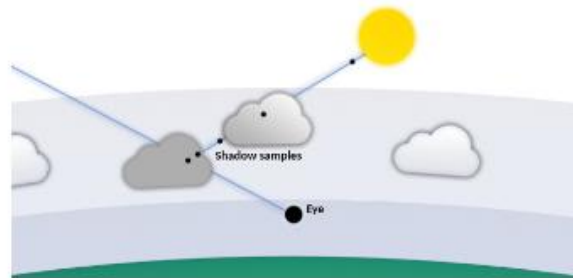


Figura 16: Aumento exponencial do tamanho do passo em direção ao sol (retirado de [5]).

Andar em direção ao sol tem um grande impacto no desempenho, pois para cada passo é necessário executar um número extra de passos. Na implementação, quatro passos em direção ao sol são dados como um aumento exponencial do tamanho dos passos. Isso ocorre, pois se tem o objetivo de que maior parte da contribuição seja da própria nuvem enquanto se recebe sombras de outras nuvens.

A contribuição da luz ambiente é adicionada usando um gradiente linear das nuvens de baixo para cima, que aumenta com a altitude. A força da cor da contribuição ambiental é controlada pelo módulo da nuvem.



## Cloud Rendering

### 3.2 Resultados

Antes de se chegar ao resultado final, várias otimizações foram implementadas para que esta técnica de renderização em nuvem atingisse o desempenho em tempo real.

As otimizações feitas foram:

1. Resolução de destino de renderização: em que houve a diminuição da resolução dos alvos de renderização para metade da original, para que a renderização seja mais rápida.
2. Resolução da textura: Reduziu-se a quantidade de recursos necessários para a textura, usando um quarto da resolução para o eixo y, pois a textura era repetida mais em x e z do que em y.
3. Usou-se uma técnica de *Upsampling Temporal*, assim é possível executar menos etapas ao marchar sem reduzir a qualidade visual das nuvens.
4. Saída antecipada: é possível sair mais cedo no *shader* se a transmissão for alta ou baixa.

Os resultados deste método de renderização permaneceram muito realistas como se pode observar nas figuras 17 e 18, onde há uma comparação das nuvens renderizadas no jogo com uma fotografia real.

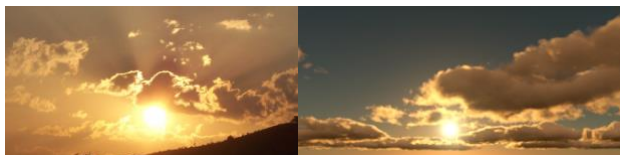


Figura 17: A imagem da esquerda é a real, e a da direita é a renderizada pelo jogo (retirado de [5]).

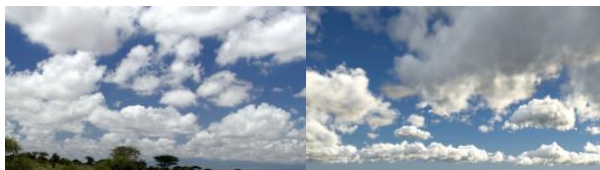


Figura 18: A imagem da esquerda é uma *Cumulus* real, e a da direita é a renderizada pelo jogo (retirado de [5]).

### 4 Conclusões finais

A técnica de renderização de nuvens elaborada e apresentada pode produzir muitas nuvens sob condições de iluminação totalmente dinâmicas. No entanto, para atingir o máximo de proximidade da realidade, precisava de algumas otimizações adicionais, como raios de sol, reflexos e as sombras das nuvens no meio ambiente. Para além disso, esta renderização não suporta nuvens que se sobrepõem à altitude. Isso sucede porque a textura climática armazena apenas a cobertura, a altura e a altitude inicial. Isto poderia ser facilmente alterado e resolvido, mas influenciava negativamente o tempo de execução da renderização.

Apesar das limitações este método já foi uma evolução drástica em relação à técnica que usavam anteriormente para renderizar nuvens. Concretizar a realizar nuvens volumétricas 3D é um grande processo visual nos videojogos. Adicionalmente, esta implementação está aberta a ser mais tarde evoluída e completada de forma a se aproximar ainda mais da realidade.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. Bouthors, F. Neyret, N. Max, É. Bruneton, and C. Crassin. Interactive multiple anisotropic scattering in clouds. In Proc. ACM Symp. on Interactive 3D Graph. and Games, 2008.
- [2] Consultar site: <https://www.infoescola.com/meteorologia/tipos-de-nuvens/>
- [3] Eva Cerezo, Frederic Perez-Cazorla, Xavier Pueyo, Francisco Seron, François X. Sillion. A Survey on Participating Media Rendering Techniques. Visual Computer, Springer Verlag, 2005.
- [4] Roland Hufnagel and Martin Held. A survey of cloud lighting and rendering techniques. In Journal of WSCG 20, 3, pages 205–216, 2012.
- [5] Rurik Högfeldt, Convincing Cloud Rendering: An Implementation of Real-Time Dynamic Volumetric Clouds in Frostbite, Master's thesis in Computer Science – Computer Systems and Networks, University of Gothenburg, 2016.
- [6] Consultar site: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Frostbite\\_\(motor\\_de\\_jogo\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Frostbite_(motor_de_jogo))
- [7] Ken Perlin. An image synthesizer. In ACM SIGGRAPH Computer Graphics: Volume 19 Issue 3, Jul 1985.
- [8] Stefan Gustavson. Simplex noise demystified. Linköping University, <http://webstaff.itn.liu.se/~stegu/simplexnoise/simplexnoise.pdf>, 2005.
- [9] Hillaire Sébastien. Physically based & unified volumetric rendering in frostbite. In SIGGRAPH, aug 2015.
- [10] L. G. Henyey and J. L. Greenstein. Diffuse radiation in the Galaxy. Astrophys Journal, 93:70–83, January 1941.
- [11] N. Max, G. Schussman, R. Miyazaki, and K. Iwasaki. Diffusion and multiple anisotropic scattering for global illumination in clouds. Journal of WSCG 2004, 12(2): pp. 277, 2004.
- [12] S. Premoze, M. Ashikhmin, R. Ramamoorthi, and Sh. K. Nayar. Practical rendering of multiple scattering effects in participating media. In Proc. Eurographics Worksh. on Render. Tech., pages 363–373. Eurographics Association, June 2004.
- [13] F. Neyret. A phenomenological shader for the rendering of cumulus clouds. Technical Report RR-3947, INRIA, May 2000.
- [14] A. Bouthors, F. Neyret, and S. Lefebvre. Real-time realistic illumination and shading of stratiform clouds. In EG Workshop on Natural Phenomena, Vienna, Austria, 2006.