

Sistema Composto para Amostragem e Geração de Luzes a partir de Mapas de Iluminação

Aldo R. Zang
Laboratório VISGRAF - IMPA
zang@impa.br

Luiz Velho
Laboratório VISGRAF - IMPA
lvelho@impa.br

Abstract

In this paper¹ we introduce a new approach to the problem of direct illumination in physically-based rendering of 3D scenes using *illumination maps* captured from real environments. We developed a system that takes advantage of the best features of the current solutions to the problem: namely, the approximation of illumination maps through directional lights; and stochastic sampling of the light maps. Our framework is flexible and can be used with most rendering programs.

Keywords: Three-dimensional Graphics and Realism, Sampling, Rendering, Environment Mapping, Importance Sampling, Deterministic Sampling.

Resumo

Neste artigo¹ apresentamos uma nova abordagem para o problema de iluminação direta na renderização fotorealista com mapas de iluminação provenientes de cenas reais. Desenvolvemos um sistema que extrai o melhor das duas principais abordagens existentes para o problema: aproximação dos mapas de iluminação com luzes direcionais, e amostragem estocástica dos mapas.

1. Introdução

A renderização de cenas complexas, com iluminação indireta, iluminação ambiente, e outros tipos de fontes de luz representa um problema desafiador e de grande interesse da comunidade de computação gráfica. Atualmente a renderização fotorealista de cenas sintéticas com iluminação proveniente de mapas de iluminação extraídos de ambientes reais é um ponto muito estudado no

processo de síntese de imagem, e também com grande demanda de soluções eficientes, uma vez que técnicas de incorporação de objetos sintéticos em filmes e comerciais são muito procurados. É verdade que um resultado fotorealista depende de vários fatores além da iluminação, como a modelagem dos objetos e propriedades dos materiais, mas tudo isto não pode ser apreciado se não tivermos um método de visualização efetivo e uma iluminação realista.

Para renderizar objetos sintéticos em cenas reais é preciso dispor da iluminação do ambiente real onde será feita a inserção, que pode ser capturada como uma imagem esférica de alta variação dinâmica (HDR - High Dynamic Range). Esta técnica de captura de iluminação foi introduzida por Paul Debevec [1], está presente em muitos programas comerciais e foi utilizada em vários filmes.

1.1. O problema de iluminação direta

O problema central do rendering é calcular a equação

$$L_o(p, \omega_o) = \int_{S^2} f(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos\theta_i| d\omega_i$$

da radiância L_o que chega ao ponto p na direção ω_o ; onde $L_i(p, \omega_i)$ é a radiância incidente em p na direção ω_i , $f(p, \omega_o, \omega_i)$ é a BSDF (função de reflectância bidirecional), e θ_i é o ângulo de incidência [4].

No contexto de iluminação direta estamos interessados na radiância proveniente diretamente das fontes luminosas (denotadas $L_d(p, \omega)$), portanto a integral anterior pode ser escrita como

$$\int_{S^2} f(p, \omega_o, \omega_i) L_d(p, \omega_i) |\cos\theta_i| d\omega_i$$

A mesma pode ser quebrada num somatório sobre as fontes de luz da cena

$$\sum_{j=1}^{luzes} \int_{S^2} f(p, \omega_o, \omega_i) L_{d(j)}(p, \omega_i) |\cos\theta_i| d\omega_i,$$

¹ Resumo estendido de dissertação de mestrado.

onde $L_{d(j)}$ denota a radiância incidente em p proveniente da j -ésima fonte de luz e

$$L_d(p, \omega_i) = \sum_j L_{d(j)}(p, \omega_i).$$

Como num ambiente real temos iluminação proveniente de todas as direções, considerando um mapa de ambiente tradicional de 1024×512 pixels, teríamos 1024×512 somas, o que torna a solução computacionalmente inviável. Para reduzir este somatório, entram em cena os métodos de integração probabilísticos com estimadores de Monte Carlo. Então escolhem-se N direções ω_i com algum método probabilístico, obtendo a estimativa

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{f(p, \omega_o, \omega_i) L_d(p, \omega_j) |\cos\theta_j|}{p(\omega_j)}.$$

Neste artigo, propomos uma abordagem que pretende extrair as vantagens dos métodos de integração de Monte Carlo, introduzindo a utilização de pré-amostragem e geração de luzes direcionais. A maioria dos softwares de renderização não permite muita escolha de modelagem da iluminação real. Em alguns softwares pode-se trabalhar com o próprio mapa, o qual é utilizado pelas rotinas de amostragem de Monte Carlo, como no caso do PBRT [4], ou em outros casos é preciso realizar algum pré-processamento e transformar o mapa numa coleção de luzes pontuais ou direcionais, como é feito no Maya.

Nosso objetivo é apresentar um sistema de pré-processamento multifuncional que permita trabalhar com Mapa de Iluminação de variadas formas: obtendo uma coleção de luzes direcionais mediante métodos de amostragem como Median Cut de Debevec [2]; ou amostragem por importância baseado em Penrose Tiling de Ostromoukhov et al. [3]; ou selecionando um número grande de amostras para ser passadas às rotinas de Monte Carlo de renderizadores como PBRT e POV-Ray entre outros. Também trataremos os Mapas de Iluminação de maneira intermediária, estratificando-os, selecionando regiões das quais extrairemos luzes direcionais e outras que manteremos para passá-las às rotinas de Monte Carlo. Um sistema desta índole é muito útil, pois permite ter um controle fino dos resultados nas renderizações. Permite adaptar um Mapa de Iluminação para a maioria dos softwares de renderização, ou pela utilização do mapa como um todo, ou por partes (luzes e um conjunto de amostras).

2. Mapa de Iluminação

Existem diversos formatos para o Mapa de Iluminação, entretanto adotaremos o formato retangular latitude-

longitude. Dado um mapa de dimensões $W \times H$ neste formato, um ponto (x, y) pode ser identificado com uma direção $\vec{\omega}_i = (\phi, \theta)$ (coordenadas esféricas) tomando

$$(\phi, \theta) = \left(\frac{2x\pi}{W}, \frac{y\pi}{H} \right).$$

A direção $\vec{\omega}_i$ também pode ser representada por coordenadas retangulares (x, y, z) em função das coordenadas esféricas (ϕ, θ) com

$$x = \sin\theta \cdot \cos\phi, \quad y = \sin\theta \cdot \sin\phi, \quad z = \cos\theta. \quad (1)$$

2.1. Representação do Mapa de Iluminação

Em lugar de entrar diretamente com a imagem HDR do mapa de iluminação, calculamos e incluímos a deformação de área induzida pela transformação F que mapeia o mapa latitude-longitude na esfera de direções. Os pixels das primeiras e últimas linhas da imagem do mapa correspondem a uma minúscula região circular com centro no pólo norte e sul da esfera respectivamente. Para fazer a correção, aplicamos ao mapa a função

$$F(x, y) = L(x, y) \sin\left(\frac{y}{H}\pi\right) = L(x, y) \sin(\theta)$$

onde, (x, y) é a posição no mapa latitude-longitude; $L(x, y)$ é o valor da luminância no ponto (x, y) ; e $\theta = \frac{y}{H}\pi$ é o ângulo subtendido entre o pólo norte e a direção associada ao ponto (x, y) na esfera unitária (i.e $\theta \in [0, \pi]$). Desta forma temos a seguinte relação entre o mapa original e o corrigido

$$M_c(x, y) = \sin\left(\frac{y}{H}\pi\right) M_o(x, y).$$

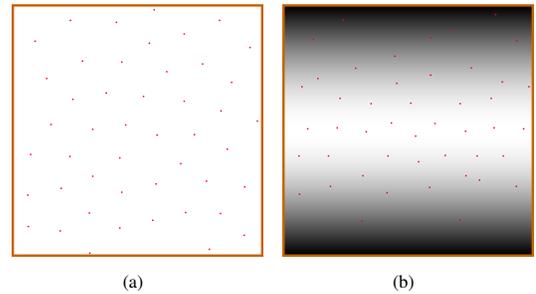


Figura 1. Amostragem com Penrose Tiling [3]: 1(a) mapa homogêneo, 1(b) mapa homogêneo com correção de área.

Na Figura 1 vemos o efeito de amostrar um mapa isoluminante e sua transformação. Como resultado, as posições

das amostras mudam quando considerarmos a deformação induzida pelo mapeamento esférico.

Com esta estratégia podemos amostrar várias superfícies curvas desde que se tenha uma parametrização da superfície no plano que permita proceder com a amostragem.

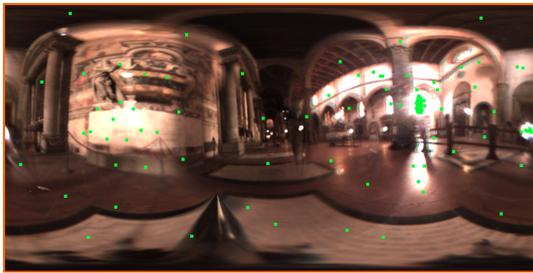
Feita esta correção do mapa, aplicamos a técnica de amostragem por Penrose Tiling de [3]. Uma vez que dispomos das amostras adaptadas, podemos trabalhar com elas.

2.2. Geração de luzes direcionais

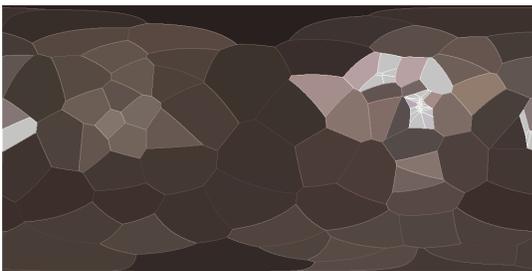
Com a localização das amostras no mapa de iluminação, calculamos sua posição (x, y, z) na esfera unitária com a equação (1). Em seguida calculamos as células de Voronoi sobre a esfera, e finalmente somamos a radiância em cada célula e dividimos pela sua área para obter a radiância média que representará cada luz direcional. Utilizamos o conjunto de luzes para renderizar a cena.

2.3. Geração de mapa de amostras

Uma alternativa à geração de luzes direcionais e à amostragem direta do mapa por métodos de Monte Carlo é realizar uma pré-amostragem do mapa e passar estas amostras ao renderizador para utilizá-las na renderização.



(a)



(b)

Figura 2. Mapa HDR Galileo [1], 124 amostras com Penrose Tiling [3]: 2(a) amostragem do mapa com prévia correção da função de importância (luminância), 2(b) células de Voronoi da amostragem 2(a).

Desenvolvemos um plugin (*FHIS*) para o PBRT [4] que utiliza um mapa de pré-amostras para realizar a renderização. Na criação do mapa de pré-amostras guardamos: a posição das amostras no mapa (Figura 2(a)); uma imagem latitude-longitude da divisão do mapa em células de Voronoi sobre as amostras, calculada sobre a esfera (Figura 2(b)); e uma lista da radiância total de cada célula de Voronoi. Esta aproximação do mapa de iluminação original por uma segmentação de Voronoi diminui entre 20 e 25 por cento o tempo de renderização da cena, além de contribuir para uma pequena melhora na qualidade visual da imagem final.

3. Método composto

Gostaríamos de aproveitar os benefícios de ambas as abordagens vistas anteriormente, i.e. obter diminuição da variância na cena utilizando luzes direcionais importantes e suavizar as bordas das sombras amostrando com métodos de Monte Carlo nas regiões do mapa onde a iluminação é mais fraca. Na prática existe uma infinidade de combinações a serem testadas. Até o presente momento realizamos os primeiros testes nesta nova abordagem e obtivemos resultados relevantes. Descreveremos a continuação sobre o pré-processamento realizado:

Primeiramente, estratificamos o mapa de iluminação utilizando a função luminância para definir os estratos, criando duas regiões A e B . Por exemplo, podemos tomar n estratos E_1, E_2, \dots, E_n , então a região $B = \{E_1, \dots, E_{n/2}\}$, formada pelos $n/2$ primeiros estratos, delimitará a região do mapa que acumula 50% da luminância, somando a luminância em ordem crescente; logo a região $A = \{E_{n/2+1}, \dots, E_n\}$, formada pelos $n/2$ estratos restantes, acumula 50% da luminância proveniente das zonas mais brilhantes do mapa. Em geral, quando dispomos de um mapa de iluminação proveniente de um ambiente real, a área da região A representa menos que o 5% da área total do mapa (por exemplo, no caso do Mapa Galileo a área da região A é aproximadamente 1% da área do mapa, Figura 3(a)). Esta acumulação de luminância numa pequena área pode ser aproveitada tirando amostras da região (A) e convertendo-as num conjunto Ω de luzes direcionais, Figura 3(a). Como a área é pequena, podemos representar bem a região com poucas amostras, i.e poucas luzes direcionais. A região complementar (B), cuja área representa a maior parte do mapa de iluminação, pode ser tratada de duas formas:

- Guardar a região B como um mapa HDR M_B , onde os pixels da região A têm radiância nula (Figura 3.b). Neste caso a renderização da cena será feita utilizando o plugin *InfiniteSample (IS)* do PBRT [4] com o mapa M_B , e a renderização do conjunto Ω de luzes direcionais obtidas a partir da região A .

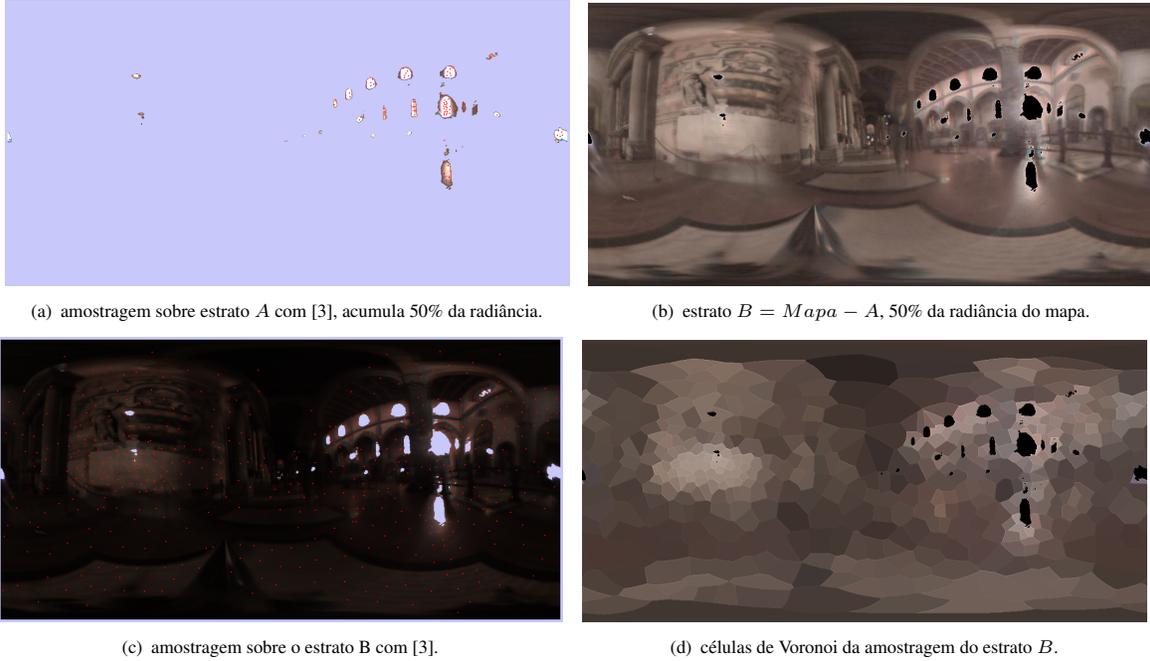


Figura 3. Estratificação do Mapa HDR Galileo [1] e amostragem pelo método de Penrose Tiling [3]: 3(a) 64 amostras transformadas em luzes direcionais, 3(c) 493 amostras, 3(d) células de Voronoi esféricas das amostras de 3(c).

- Amostrar com Penrose Tiling [3], calcular as células de Voronoi sobre a esfera e guardar um mapa HDR de Voronoi M_{BV} . Aqui a renderização será feita com o plugin *FHIS*, criado para o PBRT [4], para renderizar a iluminação dada pelo mapa M_{BV} , juntamente com renderização do conjunto Ω de luzes direcionais.

Nos testes apresentados neste artigo trabalhamos com limiares de 50% de luminância para determinar cada uma das regiões A e B . Estes limiares podem variar, se $X\%$ é o limiar utilizado para determinar A o limiar que determina B é $(100 - X)\%$. É evidente que a medida que aumentamos o limiar X , temos um conseqüente aumento da área de A . Em mapas provenientes de cenas reais a relação entre o limiar e a respectiva área é de tipo exponencial. O objetivo é tomar um limiar X alto, mas com a área da região A associada relativamente pequena, pois uma vez que a região A delimita uma área substancialmente grande do mapa, não é conveniente extrair luzes direcionais, uma vez que vamos precisar de uma quantidade grande de luzes para obter suavidade entre as sombras. Visamos continuar trabalhando neste tópico de escolha do limiar, para desenvolver um método de automação do cálculo do limiar ótimo para cada mapa.

Juntamente com a estratificação, também tivemos cuidado de introduzir controles adicionais, dado que o método Penrose Tiling de Ostromoukhov [3] apresenta alguns inconvenientes. Como o método de Ostromoukhov [3] apli-

cado a um mapa de iluminação faz amostragem hierárquica por importância de uma região retangular contínua do plano com as dimensões do mapa, e função de importância constante por partes igual à luminância do mapa, tem-se frequentemente uma alta condensação de amostras em regiões de área muito pequena. Por exemplo, muitas vezes temos duas ou mais amostras numa área que corresponde a um pixel do mapa. Este fenômeno acontece porque nos mapas extraídos de ambientes reais a variação de luminância é muito grande. Como o objetivo é obter luzes direcionais que iluminem a cena, precisamos de amostras devidamente espalhadas para cobrir bem a região A (por este motivo não temos interesse em amostras cujas proximidades é inferior a 1 pixel). Por fim, agrupamos estas amostras, aplicando um método de clusterização sugerido por Velho et al. [5], eliminando desta forma as amostras redundantes. Implementamos em nosso sistema a clusterização com três opções para a frequência F definidas abaixo.

Dado um cluster com dois elementos $K = \{c_i, c_j\}$, o nível de quantização ótima utilizando a métrica do quadrado da distância geodésica sobre a esfera é:

$$c = \frac{F_i}{F_i + F_j} c_i + \frac{F_j}{F_i + F_j} c_j,$$

$$E(c_i c_j) = \frac{F_i F_j^2 + F_j F_i^2}{(F_i + F_j)^2} \|\text{acos}(c_i \cdot c_j)\|^2,$$

onde as opções para F_i são

- $F_i = 1$,
- $F_i = \int_{Vor(c_i)} L(x)dx$,
- $F_i = \frac{\int_{Vor(c_i)} L(x)dx}{Área\ Vor(c_i)}$,

4. Resultados

Desenvolvemos o plugin FHIS (Fast Hierarchical Importance Sampling) para o PBRT [4] que realiza amostragem por importância sobre uma pré-amostragem do mapa de iluminação pelo método de Ostromoukhov [3]. Realizamos comparações numéricas com vários métodos: aproximação do mapa de iluminação por luzes direcionais (D.L.) obtidas com algoritmos de Median Cut (MC) [2] e Ostromoukhov (OS) [3], amostragem direta por importância (Plugin *IS*, PBRT [4]).

| Imagem | Método | Amostras por pixel | Erro RMS | Tempo |
|----------|-----------------|--------------------|----------|--------|
| | IS | 64 (4x16) | 0.112324 | 90.0s |
| Fig.6(a) | IS | 128 (4x32) | 0.070817 | 173.1s |
| | IS | 256 (4x64) | 0.049604 | 339.5s |
| Fig.6(e) | FHIS | 64 (4x16) | 0.104842 | 73.2s |
| | FHIS | 128 (4x32) | 0.062812 | 141.3s |
| | FHIS | 256 (4x64) | 0.043516 | 275.3s |
| Fig.6(i) | FHIS + D.L.(OS) | 128 (4x16 + 64) | 0.041018 | 157.6s |
| Fig.6(m) | FHIS + D.L.(OS) | 192 (4x32 + 64) | 0.032888 | 224.0s |
| Fig.5(b) | FHIS + D.L.(OS) | 320 (4x64 + 64) | 0.028287 | 357.8s |
| | FHIS + D.L.(OS) | 128 (4x16 + 64) | 0.040586 | 156.6s |
| | FHIS + D.L.(OS) | 192 (4x32 + 64) | 0.032419 | 225.0s |
| | D.L.(OS) [3] | 128 (4x + 128) | 0.088624 | 173.6s |
| | D.L.(OS) [3] | 256 (4x + 256) | 0.036659 | 337.6s |
| | D.L.(MC) [2] | 256 (4x + 256) | 0.049800 | 334.2s |

Tabela 1. Comparação entre renderizações. A imagem de referência foi renderizada com *IS* no PBRT [4], com 4096 (8x512) amostras (Figura 5(a)). (AMD64 3000, 2Gb RAM).

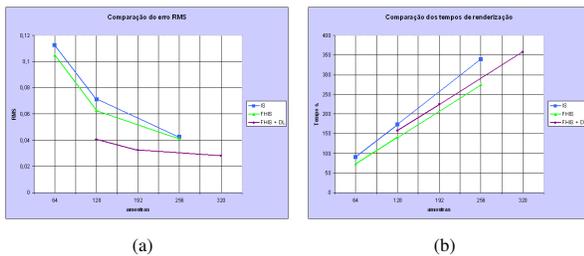
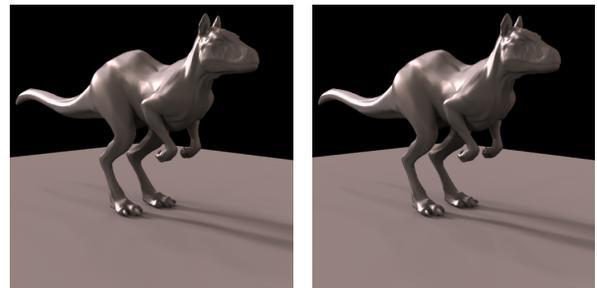


Figura 4. Comparações: 4(a) Erro RMS, 4(b) Tempo de renderização.

Na Tabela 1 incluímos os resultados dos testes mais relevantes. Na Figura 4 pode-se apreciar a comparação dos erros RMS (Figura 4(a)) e dos tempos de renderização (Figura 4(b)). Na Figura 5 mostramos a imagem de referência e o resultado obtido utilizando o método misto, e na Figura 6 mostramos as renderizações de uma cena 3D com os parâmetros da tabela 1 e detalhes ampliados de uma região das mesmas, onde pode-se ver a diferença de qualidade na reconstrução para valores similares de amostragem.

5. Conclusões

Estamos propondo uma abordagem alternativa para o tratamento de problemas de renderização fotorealista baseados em iluminação real que oferece ao usuário liberdade de escolha dos parâmetros para ter um controle mais fino do resultado da renderização. O sistema apresentado neste trabalho utiliza o método de amostragem hierárquica por importância, desenvolvido por Ostromoukhov et al. [3]. Porém, poderíamos utilizar outros métodos de amostragem, como por exemplo Median Cut [2]; aspecto que pretendemos continuar pesquisando.



(a) Imagem de referência. 4096 amostras, 256 amostras por raio, 4 raios por pixel para anti-aliasing. (b) *FHIS* 64 amostras por raio + 64 D.L.(OS) (luzes direcionais). 4 raios por pixel para anti-aliasing.

Figura 5. Renderização do modelo com o Mapa Galileo.

Referências

- [1] P. DEBEVEC. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. *SIGGRAPH*, 1998.
- [2] P. DEBEVEC. A median cut algorithm for light probe sampling. *SIGGRAPH Poster*, 2005.
- [3] J. P. OSTROMOUKHOV V., DONOHUE C. Fast hierarchical importance sampling with blue noise properties. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):488–495, 2004.
- [4] H. G. PHARR M. *Physically Based Rendering: From theory to Implementation*. Morgan Kaufmann, 2004.
- [5] S. M. V. R. VELHO L., GOMES J. Color image quantization by pairwise clustering. *SIBGRAPI*, 1998.

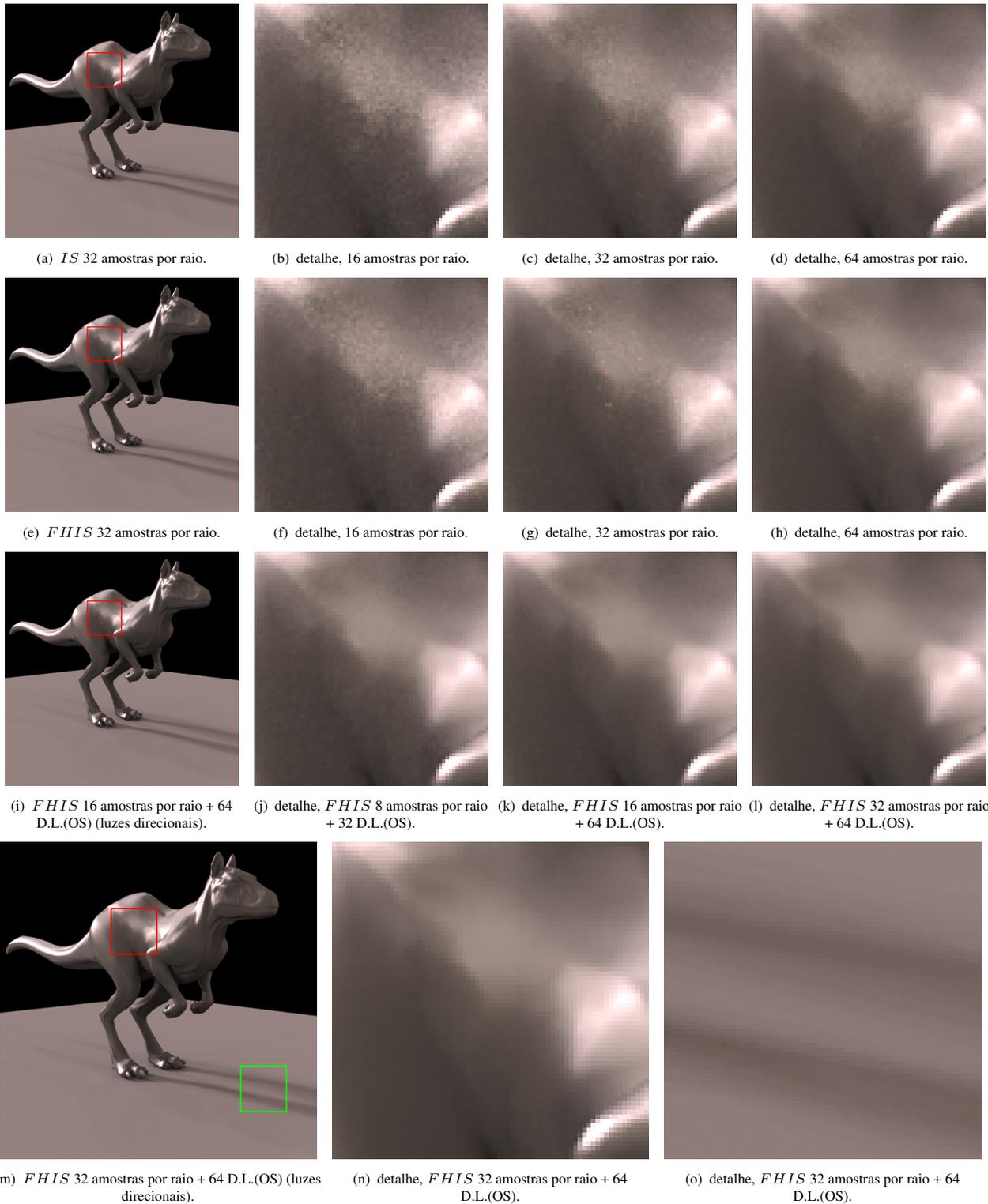


Figura 6. Renderização do modelo killeroo com o Mapa Galileo. Foram amostrados 4 raios por pixel para o anti-aliasing.