

3

Representação e visualização de dados sísmicos

O estudo das características do dado a ser visualizado permite que sejam aplicadas técnicas de computação gráfica mais adequadas às suas particularidades. A natureza do dado sísmico e aspectos relacionados à sua visualização serão explorados nessa seção. Apesar de o domínio sísmico ser o foco do trabalho, as discussões e resultados obtidos nessa dissertação são válidos para visualização volumétrica em geral.

Na próxima seção será abordado o processo de obtenção e representação de dados sísmicos tridimensionais, também conhecidos como volumes sísmicos. A visualização desses volumes será discutida na Seção 3.2. Na Seção 3.3, Será apresentado o modelo de iluminação por oclusão direcional, abordando a equação de transporte da radiação que descreve como se dá a interação da luz com o volume.

3.1

Dados sísmicos tridimensionais

A exploração de hidrocarbonetos, tais quais petróleo e gás natural, pode ser realizada através da reflexão de uma onda sísmica. Esse processo, denominado de sísmica de reflexão, se divide em três etapas: aquisição, processamento e interpretação dos dados sísmicos.

A primeira delas, aquisição do dado sísmico, consiste na utilização de uma fonte geradora de ondas sísmicas que são propagadas abaixo da superfície da terra e permitem a identificação de seus elementos constituintes. Em aquisições terrestres, pode-se utilizar como fonte geradora a detonação de dinamites, enquanto nas aquisições marinhas as fontes normalmente utilizadas são canhões de ar pneumáticos.

Dessa forma, a onda sísmica produzida pela fonte se propaga pelo interior da terra, e ao encontrar uma interface entre duas camadas de rocha com valores de impedância acústica diferentes, parte da onda é refletida e a outra parte continua viajando na nova camada. A parte refletida da onda que retorna à superfície é captada nos receptores e gravada em sismógrafos.

Esse processo é realizado diversas vezes e sobre diferentes ângulos, sendo

resultante do levantamento sísmico um conjunto de pontos que possuem a posição da fonte no momento do disparo, a posição do receptor no instante em que a onda foi captada, o tempo de viagem da onda, desde a camada em que foi refletida até o receptor, bem como o valor da amplitude da onda recebida. Esse dado é conhecido como pré-empilhado e é enviado para ser processado.

Na etapa de processamento os dados são tratados de forma a se identificar e minimizar erros e ruídos inerentes ao levantamento sísmico. Para isso é realizado o empilhamento do dado. Este processo consiste na reorganização dos dados de forma a gerar uma grade regular tridimensional para a área de aquisição, onde cada elemento da grade (voxel) contém o valor da amplitude sísmica. Duas das dimensões desse dado são espaciais, representando as posições das fontes e dos receptores. Essas posições são transformadas de forma a representarem a mesma posição para uma mesma onda sísmica.

Além disso, a terceira dimensão do dado pode ser considerada temporal. Considerando a posição da fonte e do receptor a mesma na superfície, o tempo de cada amostra é dado pelo tempo que a onda leva até ser refletida mais o tempo de retornar a superfície. Uma coluna de amostras com as mesmas coordenadas espaciais, obtidas à uma determinada inclinação, variando apenas o tempo, é chamada de traço sísmico.

O empilhamento em sí é realizado para cada cela da grade. São identificados todos os traços sísmicos pertencentes a esta cela e é realizada uma média entre os traços com o objetivo de se reduzir o ruído. Ao fim do processamento, é gerado um dado sísmico pós-empilhado.

A Figura 3.1 mostra um volume sísmico com os valores de sua grade regular. São observadas duas dimensões espaciais, denominadas de inline (direção das linhas sísmicas) e crossline (direção perpendicular às linhas sísmicas), além da dimensão temporal. A cada ponto 3D (inline, crossline, tempo) está associado um valor de amplitude sísmica.

A última etapa consiste na interpretação do dado sísmico. Nessa etapa, em geral um geólogo ou geofísico analisa os dados obtidos a fim de criar um modelo que represente a geologia contida no levantamento sísmico. A visualização volumétrica dos dados pode facilitar e automatizar muitas das tarefas realizadas pelo intérprete, tais quais detecção de horizontes e falhas sísmicas.

3.2

Visualização volumétrica de dados sísmicos

Visualização volumétrica é uma técnica bastante difundida em diversas áreas, seja para a visualização de dados médicos, sísmicos, engenharia, dentre

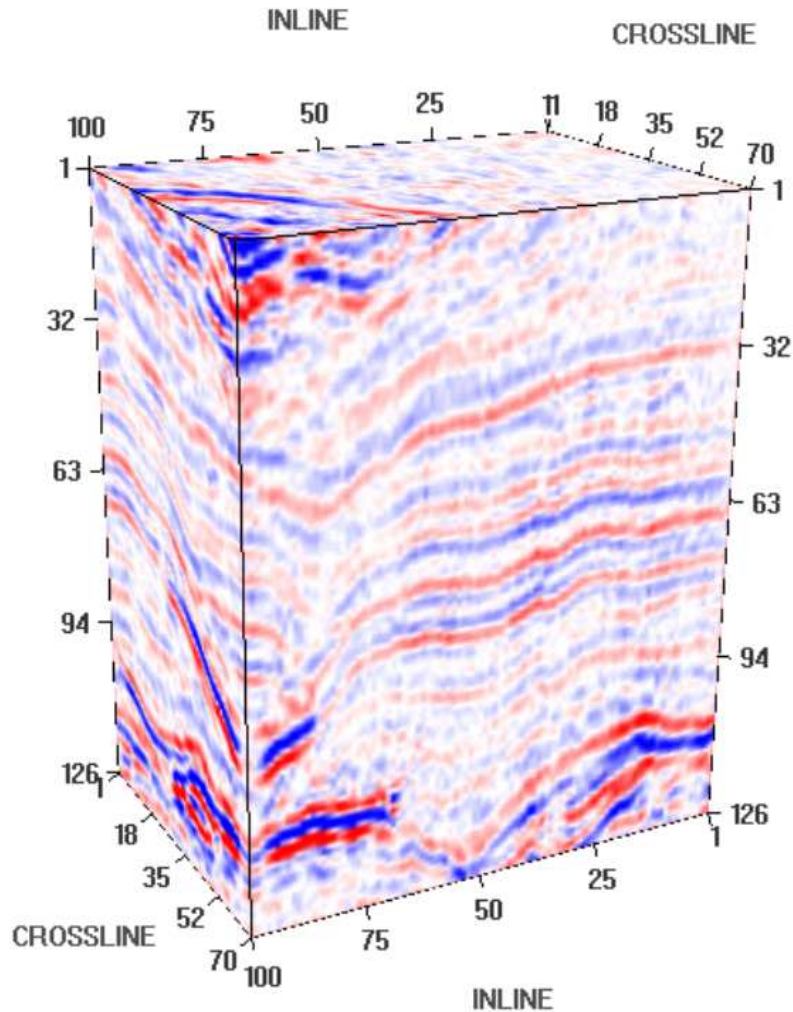


Figura 3.1: Volume sísmico com sua grade regular. Adaptada de [1].

outros. Sua estrutura volumétrica permite que sejam visualizadas as características internas do modelo interessantes ao domínio de estudo. Devido ao caráter volumétrico do dado, sua interação com a luz é complexa, sendo necessários modelos óticos para descrever os efeitos da luz sobre o dado 3D.

Nos dados volumétricos, a cada ponto 3D do volume está associado um valor escalar. O algoritmo de visualização volumétrica consiste em modelar a interação da luz com os elementos desse volume baseado no comportamento físico da luz. Diversos modelos [19] podem ser utilizados para simular o comportamento da luz interagindo com o meio. Um dos mais utilizados é o de emissão e absorção, em que as partículas emitem e absorvem a luz que chega até elas, não levando em conta a iluminação indireta nem os efeitos segundo espalhamento da luz.

A integral de visualização volumétrica [7], [9] descreve como se dá essa interação entre a luz e o volume. Ela simula como um raio de luz interage com a partícula através da integração das propriedades da luz (calculadas de

acordo com o valor escalar associado a partícula) durante a travessia do raio pelo volume.

Considerando-se apenas os efeitos de emissão e absorção, na integral de visualização volumétrica são integrados os coeficientes de absorção da luz e a cor emitida, que representa a energia radiante emitida ao longo do raio. Na próxima seção será abordada a equação de transporte da radiação [5], utilizada no modelo de iluminação por oclusão direcional proposto por Schott et al. Além dos efeitos de emissão e absorção, é realizada a simulação do efeito de espalhamento da luz interagindo com o dado.

Atributos físicos bastante utilizados em visualização volumétrica são a cor, para representar a energia emitida, e a opacidade, que representa o coeficiente de absorção do meio. Dessa forma, a manipulação dos valores da opacidade de determinados conjuntos de pontos que tenham os mesmos valores associados a eles torna possível que seja realizada a transparência de determinadas estruturas do dado, além do realce de outras áreas. Esse mapeamento dos valores escalares presentes no volume (cor e opacidade) pode ser denominado de classificação dos pontos e geralmente é realizado com o auxílio de funções de transferência [20].

As funções de transferência podem ser unidimensionais, onde para um dado valor escalar, existe um RGBA associado a ele, ou multidimensionais, utilizadas para refinar o processo de classificação dos elementos presentes no volume, utilizando uma combinação de valores interessante ao domínio sendo visualizado.

A organização espacial dos dados do volume pode ser de forma regular, onde para cada ponto de um grid regular igualmente espaçado, é associado um valor escalar a ele, sendo esse ponto denominado de voxel. Ou pode ser um dado irregular, onde os pontos estão distribuídos no espaço geralmente em malhas de tetraedros ou hexaedros.

A visualização volumétrica de dados irregulares foi abordada no recente trabalho de Miranda e Celes [21]. Devido a característica dos dados sísmicos de sempre possuírem uma grade regular associada, o escopo desse trabalho se restringe a visualização volumétrica de dados regulares. Dessa forma, pode-se armazenar o volume a ser visualizado em uma textura 3D, ou ainda em uma pilha de texturas 2D.

Ao se visualizar esse dado 3D, pode-se adotar uma abordagem indireta, onde é extraída uma superfície no dado, em pré-processamento, para depois renderizá-la, ou utilizar um método direto, o qual utiliza um modelo ótico para descrever como a luz é refletida, absorvida, emitida e espalhada ao atravessar o volume. Duas técnicas bastante difundidas nessa área são a visualização

volumétrica baseada em fatias e a baseada no algoritmo de traçado de raios.

3.2.1

Visualização volumétrica baseada em fatias

Essa técnica de visualização volumétrica direta tem a característica de renderizar fatias do dado, combinando-as de acordo com um modelo ótico, através da projeção de cada fatia gerada na tela em cada passo da avaliação da integral de visualização volumétrica. Ao final, tem-se o volume como um todo.

Essas fatias são geradas pela interseção do dado 3D com planos alinhados pelo eixo em que passa a direção do observador, como pode ser visto na figura 3.2. O número de fatias a serem utilizadas é um importante parâmetro a se levar em consideração na renderização volumétrica baseada em fatias. Dependendo do objetivo, podem ser utilizadas mais fatias para melhorar a visualização ou menos a fim de proporcionar um processamento mais eficiente. Pode-se utilizar o tamanho do voxel para se chegar a um bom espaçamento entre as fatias.

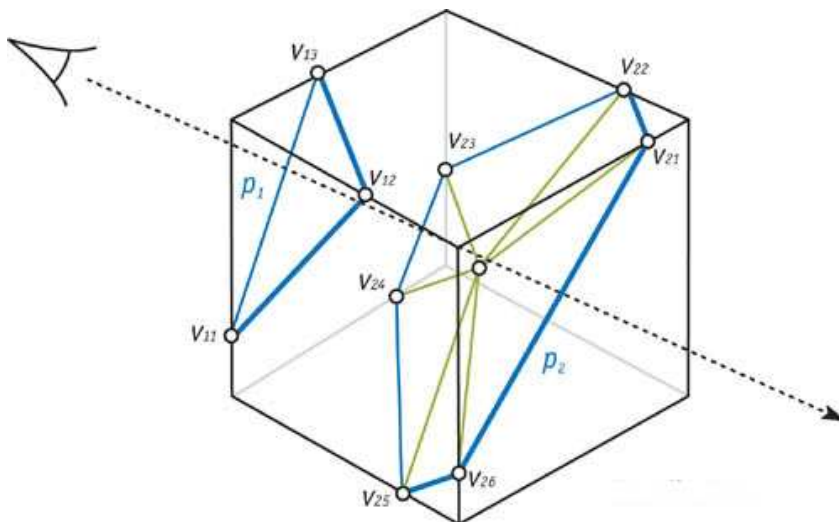


Figura 3.2: Fatias geradas na direção perpendicular ao eixo do observador. Adaptada de [2].

O grande vantagem dessa técnica em relação a visualização volumétrica baseada no traçado de raios é justamente a informação implícita da vizinhança de uma amostra que está sendo renderizada. Esta informação pode ser utilizada, por exemplo, para simular alguns modelos de iluminação global como a técnica de oclusão por ambiente.

3.2.2

Visualização volumétrica baseada no algoritmo de traçado de raios

Na visualização volumétrica baseada no algoritmo de traçado de raios, são lançados diversos raios da posição do observador, a fim de capturar a percepção que o mesmo tem da cena. Para cada pixel da tela é lançado um raio partindo da posição do olho, em direção ao centro do pixel, o raio então irá atravessar o volume, integrando as propriedades da luz pelas amostras do volume em sua trajetória, como pode ser visto na Figura 3.3. Para cada amostra na trajetória do raio é avaliado um modelo óptico que descreve a interação da luz com o meio, até deixar o volume e fornecer a informação da cor associada àquele pixel.

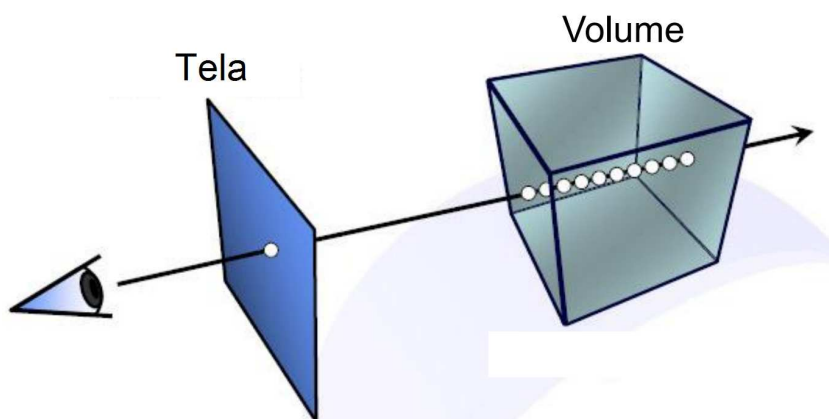


Figura 3.3: Raio correspondente a uma amostra na tela atravessando o volume. Amostras no raio uniformemente espaçadas. Adaptada de [3].

O modelo de emissão e absorção proposto por [7] é bastante utilizado em visualização volumétrica baseada no algoritmo de traçado de raios, são adicionados ainda outros efeitos à luz, de forma a proporcionar um maior realismo ao volume sendo visualizado. Devido à característica de ser lançado um raio para cada pixel da tela, essa técnica de visualização volumétrica é naturalmente paralelizável.

3.3

Modelo de iluminação por oclusão direcional

O modelo de iluminação por oclusão direcional proposto por Schott et al [4], simula aspectos da iluminação global como sombra e penumbra. Esse modelo assume que a luz é direcional, no sentido do observador ao modelo. A avaliação da quantidade de luz ambiente que chega a determinado ponto do volume considera apenas um cone de dispersão da luz em torno desse ponto, como pode ser visto na Figura 3.4. Dessa forma, é considerada a oclusão que os elementos do volume, na trajetória da luz ambiente, causam ao ponto a ser iluminado.

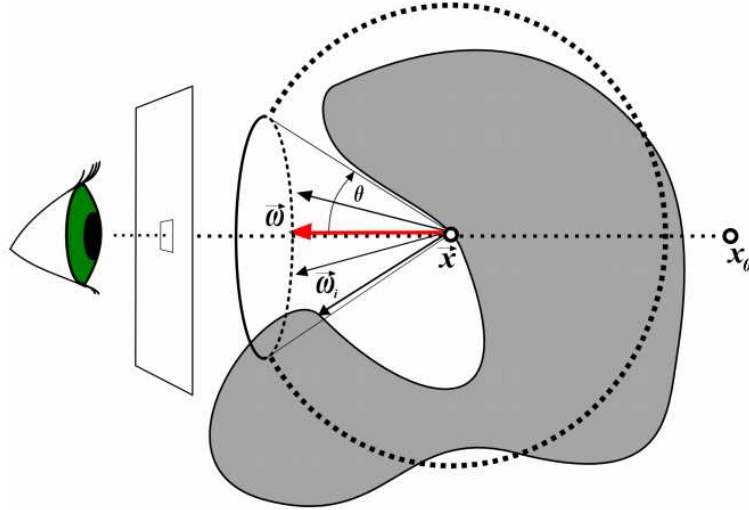


Figura 3.4: Radiação representada pelo círculo pontilhado, sendo dispersada apenas no cone de eixo alinhado com a direção da luz (\vec{w}). Adaptada de [4].

A interação da luz com o volume é modelada de acordo com a equação de transporte da radiância [5]. Essa equação leva em conta os efeitos de absorção, emissão e dispersão da radiância no meio. A Figura 3.5 ilustra os efeitos simulados na equação de transporte da radiância.

A equação de transporte da radiância, abordada em [5], [22] e [23], é apresentada na Equação (3-1), que modela a radiância ao longo de um raio, sofrendo influência do meio por onde passa:

$$L(\vec{x}, \vec{w}) = T(\vec{x}, \vec{x}_0) L_b(\vec{x}_0, \vec{w}) + L_m(\vec{x}, \vec{w}) \quad (3-1)$$

onde \vec{x} é o ponto ao longo do raio em que chega a radiância, \vec{x}_0 a origem do raio e \vec{w} a direção de propagação do raio. Essa equação representa a radiância que atinge determinado ponto, com $T(\vec{x}, \vec{x}_0)$ sendo o fator de transparência que indica quando da radiância é preservada na passagem de \vec{x} até \vec{x}_0 . A radiância segundo meio é dada por $L_m(\vec{x}, \vec{w})$ e representa os efeitos de emissão, absorção e dispersão da radiância ao interagir com as partículas do meio, e a radiância segundo o *background*, $L_b(\vec{x}_0, \vec{w})$, representa a única fonte de energia radiante caso a luz atravessasse o meio sem sofrer interagir com o mesmo.

Decompondo a parcela da radiância do meio:

$$L_m(\vec{x}, \vec{w}) = \int_{\vec{x}}^{\vec{x}_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_a(\vec{x}') L_e(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' + \int_{\vec{x}}^{\vec{x}_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_s(\vec{x}') L_i(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' \quad (3-2)$$

tem-se para um ponto 3D \vec{x}' na trajetória do raio, $L_e(\vec{x}', \vec{w})$ representa a radiância emitida pelo meio, com σ_a sendo o coeficiente de absorção do material

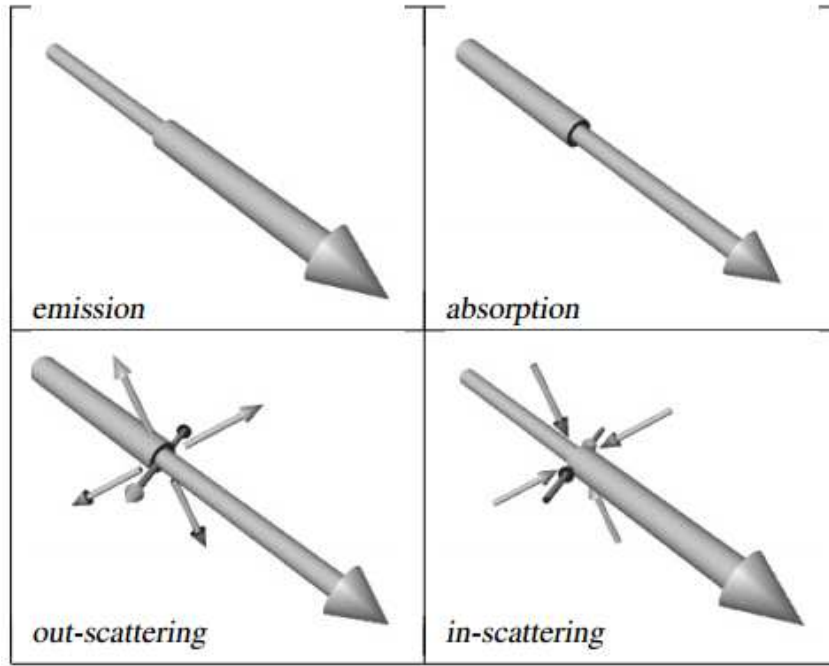


Figura 3.5: Efeitos resultantes da interação da luz com o meio. São exemplificados a absorção, emissão, dispersão de entrada (in-scattering) e dispersão de saída (out-scattering). Adaptada de [5].

em que a luz está passando e $L_i(\vec{x}', \vec{w})$ a radiância segundo a dispersão de entrada no ponto \vec{x}' levando em conta o coeficiente de dispersão da luz no meio, σ_s .

O fator de transparência da radiância ao atravessar o meio é computado através da Equação (3-3), e representa a quantidade de radiação transmitida de um ponto \vec{x}_a até um ponto \vec{x}_b sem ser absorvida, de acordo com o modelo de decaimento óptico da luz. O decaimento é modelado pela integral da Equação (3-4), onde $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$ representa o coeficiente da radiância dissipada.

$$T(\vec{x}_a, \vec{x}_b) = e^{-\tau(\vec{x}_a, \vec{x}_b)} \tag{3-3}$$

$$\tau(\vec{x}_a, \vec{x}_b) = \int_{\vec{x}_a}^{\vec{x}_b} \sigma_t(\vec{x}) dx \tag{3-4}$$

A radiância segundo a dispersão de entrada no ponto \vec{x}' , $L_i(\vec{x}', \vec{w})$, é definida pela Equação (3-5) como sendo a integral da radiância que chega a um ponto 3D \vec{x}' por todas as direções \vec{w}_i ponderadas pela função de fase $\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i)$:

$$L_i(\vec{x}', \vec{w}) = \int_{S^2} L(\vec{x}', \vec{w}_i) \Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) d\vec{w}_i \tag{3-5}$$

A avaliação recursiva de $L(\vec{x}', \vec{w}_i)$ na Equação (3-5) torna difícil a computação da equação de transporte da radiação. O modelo de iluminação

por oclusão direcional [4] propõe modificações nessa equação de transporte da radiação sem que a visualização seja significativamente prejudicada e reduzindo bastante o custo computacional. Assume-se que o meio não emite radiação $L_e(\vec{x}', \vec{w}) = 0$, que apenas as radiações de primeira ordem são consideradas no modelo (eliminando a recursão da integral) e que a dispersão da luz só ocorre na função de fase cônica com ângulo de abertura $\theta \in [0, \frac{\pi}{2})$, definida pela Equação (3-6)

$$\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi(1-\cos\theta)} & \text{se } \langle \vec{w}, \vec{w}_i \rangle > \cos\theta \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (3-6)$$

onde o raio $r = \frac{1}{2\pi(1-\cos\theta)}$ normaliza a função de fase ($\int_{S^2} \Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) d\vec{w}_i = 1$), \vec{w} corresponde à direção do observador e \vec{w}_i é escolhido de forma que $\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) \neq 0$.

Tem-se então que para um raio de direção \vec{w}_i , saindo do volume em $x'_{0,i}$ com a direção do observador \vec{w} , a Equação (3-1) que define $L(\vec{x}', \vec{w}_i)$ pode ser simplificada pelas seguintes equações:

$$L_m(\vec{x}, \vec{w}) = \int_{\vec{x}}^{\vec{x}_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_s(\vec{x}') L_i(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' \quad (3-7)$$

$$L_i(\vec{x}', \vec{w}) = L_a V(\vec{x}', \vec{w}) \quad (3-8)$$

$$V(\vec{x}', \vec{w}) = \int_{S^2} T(\vec{x}', x'_{0,i}) \Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) d\vec{w}_i \quad (3-9)$$

onde a radiação segundo a dispersão de entrada $L_i(\vec{x}', \vec{w})$ no ponto \vec{x}' é dada pelo produto entre a radiação ambiente L_a , e o termo de visibilidade fracionário $V(\vec{x}', \vec{w})$, o qual é equivalente ao fator de oclusão utilizado na técnica de oclusão por ambiente e representa o quanto de luz ambiente atinge o ponto \vec{x}' , ponderado pela função de fase cônica $\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i)$.

A equação resultante proposta no modelo de iluminação por oclusão direcional é:

$$L(\vec{x}, \vec{w}) = T(\vec{x}, \vec{x}_0) L_b(\vec{x}_0, \vec{w}) + \int_{\vec{x}}^{\vec{x}_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_s(\vec{x}') L_a V(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' \quad (3-10)$$

a fim de reproduzir essa equação, Schott et al propõem a utilização de um buffer para acumular a oclusão na trajetória do raio, tornando possível que a integração dos fatores de oclusão, descritos pela Equação (3-9), sejam aproximados de forma mais eficiente. No capítulo seguinte será abordada a aplicação desse modelo de iluminação utilizando visualização volumétrica

baseada no algoritmo de traçado de raios.

Esse modelo de iluminação permite que sejam obtidos resultados similares à oclusão por ambiente sem a necessidade de se avaliar a oclusão de maneira local em uma vizinhança esférica, além de ser levado em conta todas as características do volume entre o ponto a ser iluminado e a luz ambiente direcional. A iluminação é realizada sem utilizar a normal, podendo ainda serem controlados parâmetros da visualização, tais quais o ângulo de abertura do cone, que representa a região onde a luz se dispersa, bem como a função de transferência, que controla a cor emitida pela amostra do volume e a opacidade.