



Departamento de Física

Implementação de um sistema para simulação por Monte Carlo de fótons através do olho humano

Louis Filipe Pereira Castelo Branco

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientadores: Professor Doutor José Paulo Santos
Professor Doutor Pedro Vieira

LISBOA

2009

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores Prof. Doutor José Paulo Santos e Prof. Doutor Pedro Vieira pela oportunidade de trabalhar com eles neste projecto atraente. Não posso deixar de referir a constante disponibilidade que tiveram para o trabalho, e os seus elevados níveis de profissionalismo em todo o processo são uma lição extra que aprendi e que guardo como exemplo.

Não posso deixar de referir a minha família, e em especial os meus pais e irmã, aos quais estarei eternamente grato por todo o seu apoio e motivação, e por terem facultado todas as condições para poder chegar a este ponto.

Uma palavra também para todos os amigos que tive a felicidade de conhecer e partilhar momentos especiais nestes anos de faculdade, com destaque para o João, David, Valdir, Ricardo, Dário, Henrique, Vítor, Pedro, Sérgio e Madalena.

Índice de Abreviações e Siglas

<u>Abreviação ou Sigla</u>	<u>Página</u>
MCML – <i>Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues</i>	xii
MLI – Membrana limitante interna	9
CFN – Camada de fibra nervosas	9
CCG – Camada de células ganglionares	9
CPI – Camada plexiforme interna	9
CNI – Camada nuclear interna	9
CPE – Camada plexiforme externa	9
CNE – Camada nuclear externa	9
MLE – Membrana limitante externa	9
EPR – Epitélio pigmentado da retina	9
DMRI – Degeneração macular relacionada com a idade	11
c.d.o – comprimento de onda	12
CN – Camada neuronal	32

Índice de Símbolos

<u>Símbolo</u>	<u>Equação</u>	<u>Página</u>
n - Índice de refração	(4.1)	23
c - Velocidade da luz	(4.1)	23
v - Velocidade	(4.1)	23
θ_i - Ângulo de incidência	(4.2)	23
θ_r - Ângulo de reflexão	(4.2)	23
θ_t - Ângulo de refração ou transmissão	(4.2)	23
R_s - Reflectância para a polarização s	(4.2)	23
R_p - Reflectância para a polarização p	(4.3)	24
T_s - Transmitância para a polarização s	(4.4)	24
T_p - Transmitância para a polarização p	(4.4)	24
R - Reflectância total	(4.5)	24
σ_a - Secção eficaz de absorção	(4.8)	25
σ_s - Secção eficaz de dispersão	(4.8)	25
σ_t - Secção eficaz total	(4.8)	25
μ_a - Coeficiente de absorção	(4.11)	25
μ_s - Coeficiente de dispersão	(4.11)	25
μ_t - Coeficiente de interacção total	(4.11)	25
g - Anisotropia	(4.12)	26
R_{sp} - Reflexão especular	(5.1)	27
E - Energia		32
α - Ângulo de propagação		32
Z - Número atómico		34
ξ - Variável aleatória uniforme	(6.1)	36
W - Peso do fóton	(6.2)	37
s - Passo	(6.3)	37
x, y, z - Coordenadas de posição	(6.11)	38
x_2, y_2, z_2 - Co-senos directores	(6.11)	38
θ - Ângulo polar	(6.14)	38
ψ - Ângulo azimutal	(6.15)	39
d_f - Distância à fronteira	(6.18)	39
α_{crt} - Ângulo crítico		40
d - Espessura		43
N^o - Número de fótons absolutos		59

Índice

Agradecimentos	ii
Lista de Abreviações e Siglas	iii
Lista de Símbolos	iv
Índice	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	x
Índice de Gráficos	xi
Resumo	xii
Abstract	xiii
Introdução	xiv
<u>Enquadramento Teórico</u>	1
Capítulo 1: O Olho Humano	2
1.1 O Globo Ocular	2
1.1.1 Camada Externa, Esclera	3
1.1.2 Camada Média: Coróide, Corpo Ciliar e Íris	4
1.1.3 Camada Interna, Retina	5
1.1.4 Cristalino	5
1.1.5 Câmara Anterior	6
1.1.6 Câmara Posterior	7
1.2 A Retina	7
1.2.1 Disco Óptico	7
1.2.2 Mácula	8
1.2.3 Fóvea	8
1.3 Camadas da Retina	9
1.3.1 Camada de Fotorreceptores, Membrana Limitante Externa, Camada Nuclear Externa e Camada Plexiforme Externa	10
1.3.2 Camada Nuclear Interna	10
1.3.3 Camada Plexiforme Interna	10
1.3.4 Camada de Células Ganglionares e Camada de Fibras Nervosas	11
1.3.5 Membrana Limitante Interna	11
1.3.6 Epitélio Pigmentado da Retina e Membrana de Bruch	11
1.4 Fotorreceptores: Cones e Bastonetes	12
Capítulo 2: Degeneração Macular	14
2.1 Degeneração Macular relacionada com a idade – DMRI	14
2.2 DMRI seca	14
2.3 DMRI húmida	15
2.4 Drusas	16
2.4.1 Detecção de Drusas	16
Capítulo 3: Processos Estocásticos	18
3.1 Processos Estocásticos	18
3.2 Variáveis Aleatórias	18
3.2.1 Variáveis Aleatórias Discretas	18

3.2.2	Variáveis Aleatórias Contínuas	19
3.2.3	Distribuição Uniforme	20
3.2.4	Distribuição Normal (ou Gaussiana)	20
3.3	Geração de Variáveis Aleatórias	21
3.4	Método de Monte Carlo	21
Capítulo 4:	Conceitos Físicos	23
4.1	Índice de Refracção	23
4.2	Reflexão	23
4.3	Refracção	24
4.4	Coeficientes de Absorção e Dispersão	24
4.5	Anisotropia	25
Capítulo 5:	Reflectividades	27
5.1	Membrana Limitante Externa	27
5.2	Retina (excepto o epitélio pigmentado da retina)	27
5.3	Epitélio Pigmentado da Retina	28
5.4	Coróide	29
5.5	Esclera	29
5.6	Fundo Ocular Humano <i>in vivo</i>	30
Metodologia	31	
Capítulo 6:	Metodologia	32
6.0	Contextualização	32
6.1	Tradução para linguagem C	34
•	9 Simulações variando o número de fótons à entrada	35
•	2 Simulações variando a espessura da camada CN	35
•	2 Simulações substituindo toda a camada CN por cálcio e estanho	35
•	6 Simulações variando o tamanho da drusa para cálcio e estanho	35
•	4 Simulações deslocando a drusa de cálcio e estanho 5 e 10 unidades	35
•	4 Simulações com drusas vazias deslocadas 0, 50, 75 e 100 unidades	35
6.2	Desenvolvimento do Modelo	36
6.2.1	Desenvolvimento da Matriz	36
6.2.2	Desenvolvimento dos conceitos físicos	36
6.3	O método MCML	37
6.3.1	Lançamento de um pacote de fótons.....	38
6.3.2	Passo.....	39
6.3.3	Deslocamento do fóton.....	40
6.3.4	Absorção.....	40
6.3.5	Dispersão.....	40
6.3.6	Fronteira.....	41
6.3.7	Terminação do pacote de fótons.....	43
6.4	Teste do código que implementa o método MCML	44
•	Condições de simulação A	44
•	Condições de simulação B	44
•	Condições de simulação C	44
6.5	Aplicação do método MCML ao fundo ocular	45
6.5.1.1	Estudo do padrão de dispersão sem drusa	45
6.5.1.2	Estudo da reflectância, transmitância e absorção sem drusa	45
6.5.1.3	Estudo da influência de uma drusa no padrão de dispersão	45
6.5.1.4	Estudo da influência de uma drusa na reflectância	46
6.6	Aplicação do modelo de matriz com alguns conceitos MCML	47

Resultados	<u>48</u>
Capítulo 7: Resultados: Apresentação e Discussão	49
7.1 Tradução para linguagem C	49
• 9 Simulações variando o número de fótons à entrada	49
• 2 Simulações variando a espessura da camada CN	50
• 2 Simulações substituindo toda a camada CN por cálcio e estanho	51
• 6 Simulações variando o tamanho da drusa para cálcio e estanho	52
• 4 Simulações deslocando a drusa de cálcio e estanho 5 e 10 unidades	53
• 4 Simulações com drusas vazias deslocadas 0, 50, 75 e 100 unidades	54
7.4 Teste do código que implementa o método MCML	56
• Condições de simulação A	56
• Condições de simulação B	57
• Condições de simulação C	58
7.5 Aplicação do método MCML ao fundo ocular	59
7.5.1.1 Estudo do padrão de dispersão sem drusa	59
7.5.1.2 Estudo da reflectância, transmitância e absorção sem drusa	61
7.5.1.3 Estudo da influência de uma drusa no padrão de dispersão	62
7.5.1.4 Estudo da influência de uma drusa na reflectância	64
7.6 Aplicação do modelo de matriz com alguns conceitos MCML	65
Conclusões	<u>66</u>
Capítulo 8: Conclusões e Perspectivas Futuras	67
Bibliografia	68

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Imagem do olho humano e suas estruturas exteriores (adaptada de <i>Eye Poster</i> de 1999 da <i>Anatomical Chart Co.</i>)	2
Figura 1.2 - Vistas anatómicas, lateral e superior, do olho humano (adaptada de <i>Eye Poster</i> de 1999 da <i>Anatomical Chart Co.</i>)	2
Figura 1.3 - Diagrama do globo ocular e seus constituintes (adaptado de Chabacano 2007 ^[7])	3
Figura 1.4 - Diagrama de um corte sagital da parte anterior do olho humano (adaptado de <i>Eye Poster</i> de 1999 da <i>Anatomical Chart Co.</i>)	4
Figura 1.5 - Detalhe do corpo ciliar e formação da íris (adaptado de <i>Eye Poster</i> de 1999 da <i>Anatomical Chart Co.</i>)	5
Figura 1.6 - Vista sagital do olho com ênfase para o corpo ciliar (adaptado de <i>Gray's Anatomy</i>)	5
Figura 1.7 - O cristalino (adaptado de <i>Eye Poster</i> de 1999 da <i>Anatomical Chart Co.</i>)	6
Figura 1.8 - A acomodação do cristalino (adaptado de [7])	6
Figura 1.9 - Retinografia (adaptado de <i>The National Eye Institute</i>)	7
Figura 1.10 - Corte da fóvea (adaptado de Washington University School of Medicine <i>Neuroscience Tutorial</i> 1997)	8
Figura 1.11 - Distribuição dos fotorreceptores na retina (adaptado de Osterberg 1935 ^[9])	9
Figura 1.12 - Histologia da retina com respectivo diagrama simplifcativo (adaptado de Washington University School of Medicine <i>Neuroscience Tutorial</i> 1997)	9
Figura 1.13 - Diagrama das diferentes estruturas dum fotorreceptor (neste caso um bastonete), e as várias camadas sobre as quais se estende (adaptado de [10])	10
Figura 1.14 - Ilustração das camadas da retina com as respectivas células (adaptado de <i>Gray's Anatomy</i>)	11
Figura 1.15 - A sensibilidade dos fotorreceptores ao comprimento de onda (adaptado de [5])	13
Figura 2.1 - Secção de uma mácula normal (A), e uma com drusas (B). (adaptado de [12])	15
Figura 2.2 - Simulação de uma visão normal (A), e outra com pontos cegos devido à existência de drusas (B) (adaptado de [12])	15
Figura 2.3 - Ilustração de uma retina sofrendo de DMRI húmida, e uma secção da mácula retratando o processo da doença (adaptado de [12])	15
Figura 2.4 - Simulação de uma visão normal (A) e (D), visão com distorção devido a metamorfopsia (B), visão com ponto cego central devido a scotoma (C) e visão de baixo contraste (E) (adaptado de [12])	15
Figura 2.5 - Retinografia mostrando a presença de vários pontos amarelos, as drusas (adaptado de [14])	16
Figura 3.1 - Exemplo duma função de densidade de probabilidade $p(x)$ para um intervalo $[a',b']$ (adaptado de [16])	19
Figura 3.2 - Função densidade de probabilidade para uma distribuição uniforme (adaptado de [7])	20
Figura 3.3 - Função densidade de probabilidade para quatro distribuições normais com diferentes parâmetros de média (μ) e desvio padrão (σ) (adaptado de [7])	20
Figura 4.1 - Um raio incidente PO incide sobre a interface entre dois meios de índice de refração n_1 e n_2 no ponto O. Parte do raio é reflectido no raio OQ e outra parte é refractada no raio OS. Os ângulos que os raios incidente, reflectido e refractado fazem com a normal à interface são θ_i , θ_r , e θ_t respectivamente (adaptado de Josh Lee 2007 ^[7])	23
Figura 4.2 - Três possíveis ocorrências para a interacção de um fóton incidente sobre um meio de espessura finita: a) transmissão; b) absorção; c) reflexão (adaptado de Santos ^[20])	25
Figura 4.3 - Diagrama polar da função distribuição de probabilidade da equação 5.8. A elipse maior é para $g = 2/3$, e a elipse menor para $g = 1/3$. A radiação incide na partícula da esquerda como indica a seta (adaptado de	

Vitkin e Côté ^[22]	26
Figura 5.1 - Características espectrais de uma retina bovina com 200 μm sem o epitélio pigmentado da retina conseguidos por Hammer et al. 1995 ^[29] . Linha contínua – 10x reflexão; linha tracejada – transmissão; e linha pontilhada – absorção	28
Figura 5.2 - Coeficientes de absorção e dispersão dum epitélio pigmentado da retina bovino obtidos por Hammer et al. (1995) ^[29]	28
Figura 5.3 - Características espectrais de um epitélio pigmentado da retina bovino com 10 μm conseguidos por Hammer et al. (1995) ^[29] . Linha contínua – 10x reflexão; linha tracejada – transmissão; e linha pontilhada – absorção	29
Figura 5.4 - Coeficientes de absorção e dispersão da esclera bovina obtidos por Hammer et al. (1995) ^[29]	29
Figura 5.5 - Características espectrais de uma esclera bovina com 700 μm conseguidos por Hammer et al. (1995) ^[29] . Linha contínua – reflexão; linha tracejada – transmissão; e linha pontilhada – absorção	30
Figura 5.6 - Espectro de reflexão <i>in vivo</i> de um fundo ocular humano temporal ao disco óptico conseguido por Hammer et al. (1993) ^[35]	30
Figura 6.1 - Sistema de eixos adoptada para o presente trabalho	32
Figura 6.2 - As 3 matrizes construídas para as respectivas camadas	32
Figura 6.3 - Fluxograma para a propagação de fótons em tecidos compostos por várias camadas implementado no método da matriz de pontos.	34
Figura 6.4 - Fluxograma para a propagação de fótons em tecidos compostos por várias camadas implementado pelo método MCML.	38
Figura 6.5 - Representação da grelha 3x3 com os 9 pontos de incidência de fótons (pontos vermelhos) sobre a superfície XZ, com as diferentes posições ocupadas pela drusa de dimensões 200x100 (XZ)	46
Figura 7.1 – Mapa de cores da dispersão dos 100.000.000 de fótons à entrada com uma escala logarítmica	59
Figura 7.2 – Gráfico 3D da dispersão dos 100.000.000 de fótons à entrada com escala logarítmica	59
Figura 7.3 – Mapa de cores da dispersão dos fótons transmitidos com uma escala logarítmica	60
Figura 7.4 – Gráfico 3D da dispersão dos fótons transmitidos com escala logarítmica	60
Figura 7.5 – Mapa de cores da dispersão dos fótons reflectidos com uma escala logarítmica	60
Figura 7.6 – Gráfico 3D da dispersão dos fótons reflectidos com escala logarítmica	60
Figura 7.7 - Mapa de cores da dispersão dos fótons reflectidos com uma escala logarítmica igual à dos fótons transmitidos ..	60
Figura 7.8 - Gráfico 3D da dispersão dos fótons reflectidos com escala logarítmica igual à dos fótons transmitidos	60
Figura 7.9 – Grelha 3x3 dos pontos de incidência dos reflectidos fótons de entrada	62
Figura 7.10 – Mapa de cores da dispersão dos fótons reflectidos para a grelha de incidência sem drusa	62
Figura 7.11 – Resultados dos padrões de dispersão dos fótons reflectidos para as diferentes posições da drusa (200x100x100), para dois valores de anisotropia $g = -1$ e $g = 0$. Cada posição de incidência foi “bombardeada com fótons até atingir 500.000 fótons reflectidos, perfazendo um total de 9x500.000 fótons reflectidos	63

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Características de cones e bastonetes (adaptado de <i>Sensation & Perception</i> de Foley e Matlin, e [11])	12
Tabela 6.1 - Parâmetros encontrados para a respectiva camada (fonte [29])	45
Tabela 7.1 - Resultados de reflectância e transmitância para uma camada com índice de refração relativo de 1	56
Tabela 7.2 - Resultados de reflectância e transmitância para uma camada com índice de refração relativo de 1,5	57
Tabela 7.3 - Resultados do teste de estabilidade onde foram realizados dez simulações com um número crescendo de pacotes de fótons à entrada, de 500 a 50 milhões. Atenta-se que só foi realizada uma simulação com 50.000.000. Os resultados estão ordenados de forma crescente para facilitar a identificação dos mínimos e máximos, tendo sido também calculados os valores médios para cada número de pacotes de fótons à entrada	57
Tabela 7.4 - Resultados de reflectância, transmitância e absorção para uma camada com índice de refração relativo de 1,33. Nos três casos considerados existe uma reflexão especular de 2% na primeira interface devido à diferença de índice de refração entre o ar e o tecido	58
Tabela 7.5 - Parâmetros encontrados para a respectiva camada (fonte [29])	59
Tabela 7.6 - Resultados obtidos para uma simulação com 100.000.000 fótons de entrada. Registou-se um valor de 0,003% de reflexão especular na interface do humor vítreo para a primeira camada MLI que está incluído no valor da reflexão total	61
Tabela 7.7 - Resultados de reflectância obtidos para simulações de 1.000.000 de fótons de entrada na posição central para cada posição da drusa	64
Tabela 7.8 - Resultados obtidos para uma simulação com 500.000 fótons de entrada	65

Índice de Gráficos

Gráfico 7.1 - Dispersão da reflexão para 40.000 fótons ^[5]	49
Gráfico 7.2 - Dispersão da reflexão para 40.000 fótons do presente trabalho	49
Gráfico 7.3 - Dispersão da reflexão para 1.000.000 de fótons ^[5]	49
Gráfico 7.4 - Dispersão da reflexão para 1.000.000 de fótons do presente trabalho	49
Gráfico 7.5 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 100 Å ^[5]	50
Gráfico 7.6 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 100 Å do presente trabalho	50
Gráfico 7.7 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 800 Å ^[5]	51
Gráfico 7.8 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 800 Å do presente trabalho	51
Gráfico 7.9 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por cálcio ($Z_{Ca}=20$) ^[5]	51
Gráfico 7.10 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por cálcio ($Z_{Ca}=20$) do presente trabalho	51
Gráfico 7.11 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por estanho ($Z_{Sn}=50$) ^[5] ...	52
Gráfico 7.12 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por estanho ($Z_{Sn}=50$) do presente trabalho	52
Gráfico 7.13 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 100x120 centrada ^[5]	52
Gráfico 7.14 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 100x120 centrada do presente trabalho..	52
Gráfico 7.15 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 centrada ^[5]	52
Gráfico 7.16 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 centrada do presente trabalho.....	52
Gráfico 7.17 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x20 centrada ^[5]	53
Gráfico 7.18 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x20 centrada do presente trabalho.....	53
Gráfico 7.19 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -5 Å no eixo X ^[5]	54
Gráfico 7.20 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -5 Å no eixo X do presente trabalho	54
Gráfico 7.21 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -10 Å no eixo X ^[5]	54
Gráfico 7.22 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -10 Å no eixo X do presente trabalho	54
Gráfico 7.23 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 centrada ^[5]	55
Gráfico 7.24 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 centrada do presente trabalho.....	55
Gráfico 7.25 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -50 Å no eixo X ^[5]	55
Gráfico 7.26 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -50 Å no eixo X do presente trabalho.....	55
Gráfico 7.27 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -75 Å no eixo X ^[5]	55
Gráfico 7.28 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -75 Å no eixo X do presente trabalho	55
Gráfico 7.29 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -100 Å no eixo X ^[5]	55
Gráfico 7.30 - Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -100 Å no eixo X do presente trabalho	55

Resumo

Este trabalho surge no âmbito de aplicar conhecimentos teóricos, sobre os fenómenos da propagação e interacção da luz com a matéria, ao caso concreto do olho humano, do qual existem resultados experimentais para posterior comparação e validação.

Para este efeito, e aproveitando algum trabalho prévio, foi implementado um sistema de simulação pelo método de Monte Carlo da luz com o objectivo de estudar a forma como os fótons interagem com as componentes posteriores do fundo ocular a nível atómico, e as alterações provocadas pela introdução de estruturas anómalas, as drusas. A simulação foi efectuada mediante a construção de programas computacionais em linguagem C.

Os resultados mostram que a distribuição espacial dos fótons se faz de forma radial e gaussiana, e que a introdução de drusas provoca alterações visíveis dependendo da sua posição e factor de anisotropia. Em relação às grandezas associadas à transmissão, reflexão e absorção, foram obtidos resultados promissores para a abordagem MCML (*Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues*), enquanto que para a abordagem da matriz de pontos existem alguns aspectos a melhorar para a obtenção de resultados plausíveis.

Conclui-se que o presente trabalho fornece dados importantes sobre a distribuição espacial dos fótons e de grandezas associadas à transmissão, reflexão e absorção dos mesmos, permitindo também comparar diferentes abordagens de simulação do problema descrito evidenciando as suas respectivas vantagens e desvantagens.

Abstract

This project aims at simulating the propagation of light through the human ocular fundus using the Monte Carlo method with the ultimate objective of automatic identification of drusen, thought to be the principal indicators of Age-Related Macular Degeneration (ARMD). In order to validate and further develop a point-matrix based representation of the ocular fundus comprised of three layers (inner limiting membrane - ILM, neuronal layer - NL - and retinal pigment epithelium - RPE), simulations applying the MCML method were carried out for comparison. Results regarding the dispersion pattern of photons and the values of transmittance, reflectance and absorption were obtained with a promising outcome for the MCML method, also revealing significant changes with the introduction of drusen in the neuronal layer. However, for the point-matrix based approach results were less satisfactory indicating the need for a better and deeper understanding of the process of propagation with this approach.

Introdução

O aparecimento de drusas é um indicador precoce de uma boa probabilidade de vir a desenvolver a degenerescência macular relacionada com a idade^[1], o qual pode ser identificado em imagens de retina como pequenas manchas de cor clara e amarela quando iluminadas com luz natural. O diagnóstico destas manchas é frequentemente realizado por médicos oftalmologistas através de técnicas de retinografia. Desta forma, efectuam uma avaliação qualitativa o que torna este método muito subjectivo. Contudo, desde 1986 que se trabalha para conseguir um método de identificação automática destas estruturas anómalas^{[2][3]}.

Para o desenvolvimento de novas técnicas de diagnóstico oftalmológico é necessário um conhecimento profundo da forma como a luz se propaga na retina. As técnicas de Monte Carlo são uma ferramenta importante para este estudo, na medida em que permitem simular todo o processo de propagação de um fóton ou de raios de luz através da retina bem como os vários fenómenos físicos subjacentes. Entre a transmissão, absorção e reflexão de fótons na retina, este último é que constituiu o alvo deste trabalho por ser a base das formas mais comuns de observação e análise do fundo ocular. Por sua vez, para estudar a reflexão da retina é indispensável um conhecimento profundo da dispersão de fótons no seu interior, e as consequências implicadas aquando da existência de estruturas anómalas, como as drusas.

A retina, tal como a maioria dos tecidos biológicos, é uma estrutura altamente dispersiva pelo que a determinação do trajecto dos fótons dentro do tecido não é um processo simples. Consequentemente, a identificação de estruturas anormais dentro do tecido através da análise de pequenos desvios na trajectória dos fótons é uma tarefa difícil. Prova-se que é possível determinar com algum nível de confiança as estruturas internas do tecido se for medido o padrão de dispersão^[4].

O objectivo deste trabalho foi de, na continuação do projecto anterior^[5], estudar como a propagação de luz na retina determina o padrão de dispersão dos fótons reflectidos numa retina normal e, consequentemente, conseguir inferir a estrutura interna da retina e identificar, caso existam, estruturas anómalas na mesma. Para isto foram aplicados os métodos de Monte Carlo e considerada a retina como a principal estrutura reflectora não dando muita relevância a outras estruturas anatómicas.

Enquadramento Teórico

- Capítulo 1: O Olho Humano
- Capítulo 2: Degeneração Macular
- Capítulo 3: Reflectividades
- Capítulo 4: Processos Estocásticos
- Capítulo 5: Conceitos Físicos

Capítulo 1 O Olho Humano

O olho humano é o órgão responsável por um dos cinco sentidos humanos, a visão. Os estímulos luminosos exteriores são captados e convertidos em impulsos nervosos por uma estrutura óptica altamente especializada, sendo por fim conduzidos até ao cérebro onde são processados de modo a produzir a sensação visual.

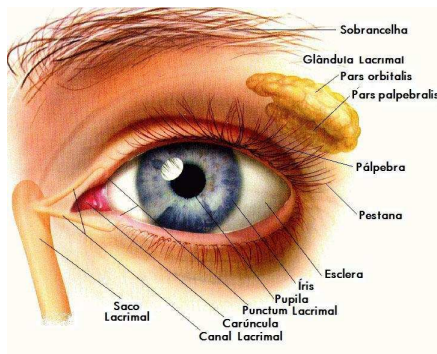


Figura 1.1 – Imagem do olho humano e suas estruturas exteriores (adaptado de *Eye Poster* de 1999 da *Anatomical Chart Co.*).

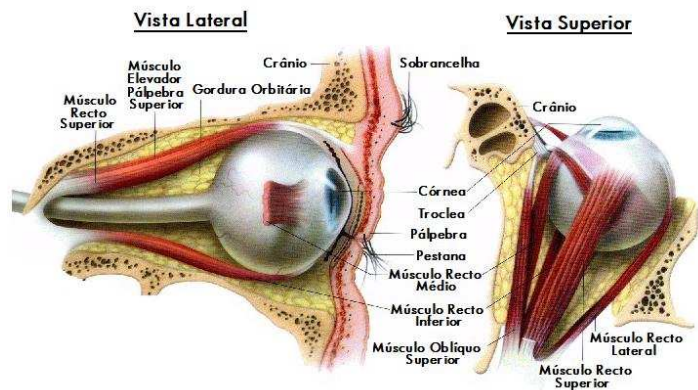


Figura 1.2 – Vistas anatómicas, lateral e superior, do olho humano (adaptado de *Eye Poster* de 1999 da *Anatomical Chart Co.*).

1.1 O Globo Ocular

Os globos oculares situam-se nas duas cavidades ósseas do crânio designadas por órbitas oculares onde estão envolvidos por gordura, vasos sanguíneos, músculos extra-oculares e a glândula lacrimal principal (Figuras 1.1 e 1.2). A cobrir e a proteger a face anterior do olho estão duas finas pregas cutaneomusculomembranas, as pálpebras, inferior e superior, sendo esta última a responsável pelo 'abrir' dos olhos. A face anterior, e externa, das pálpebras está revestida por pele, ao passo que a superfície interna está coberta por uma delgada membrana mucosa, a conjuntiva, que tem as funções de secreção basal de lágrimas (embora em menor volume do que a glândula lacrimal) e o espalhar do fluido lacrimal pela córnea, lavando-a e lubrificando-a de modo a estar sempre humedecida. As pálpebras possuem ainda um esqueleto fibroso para dar estrutura, e pequenos pêlos nas suas bordas externas, chamados cílios ou pestanas, que formam uma espécie de franja protectora do olho e impedem a entrada no olho de poeiras, insectos e outros objectos estranhos ao organismo. Acima das pálpebras, também constituídas por pêlos, estão as sobrancelhas que têm o papel de impedir que o suor da testa entre em contacto com o olho^[6].

Os músculos extra-oculares são seis, e são responsáveis pela movimentação do globo ocular, sendo quatro deles designados de *recto*, nomeadamente: recto superior (elevação), recto inferior (depressão), recto interno (abdução) e recto externo (adução)(Figuras 1.2 e 1.3). Os restantes dois músculos são os oblíquos superior e inferior ambos responsáveis pelos movimentos rotativos do olho^[7].

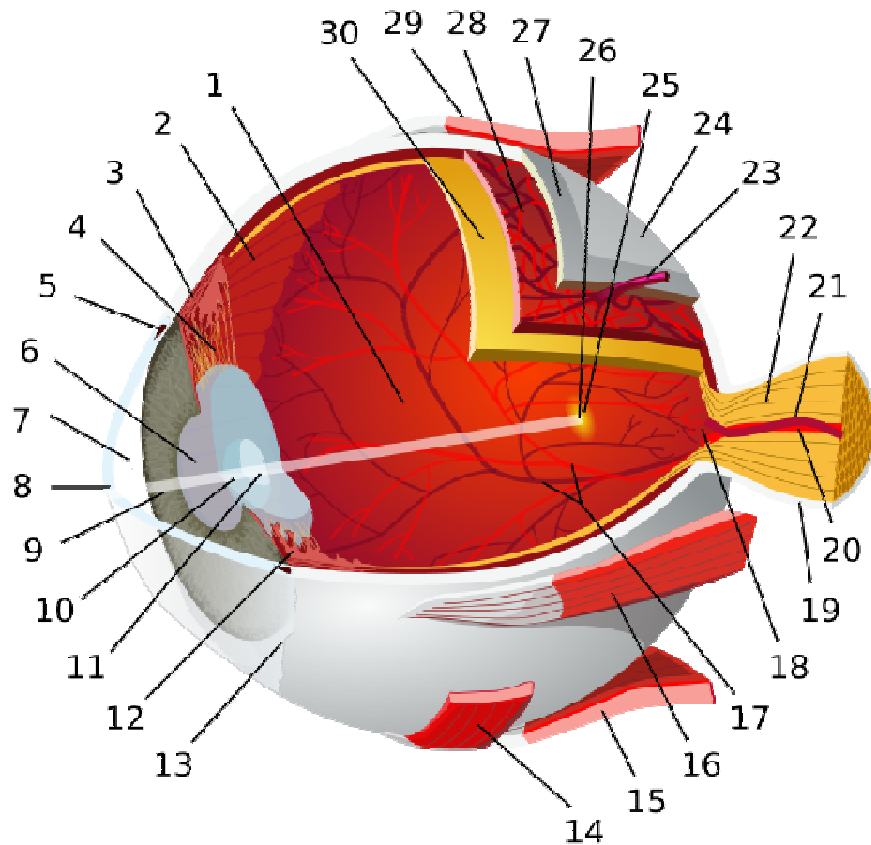


Figura 1.3 – Diagrama do globo ocular e seus constituintes (adaptado de Chabacano 2007^[7]): 1-humor vítreo; 2-ora serrata; 3-músculo ciliar; 4-ligamentos ciliares; 5-canal de Schlemm; 6-pupila; 7-câmara anterior (humor aquoso); 8-córnea; 9-íris; 10-córtex cristalino; 11-núcleo cristalino; 12-corpo ciliar; 13-conjuntiva; 14-músculo oblíquo inferior; 15-músculo recto inferior; 16-músculo recto médio; 17-artérias e veias da retina; 18-disco óptico; 19-dura mater; 20-artéria central da retina; 21-veia central da retina; 22-nervo óptico; 23-veia vorticose; 24-camada bulbar; 25-mácula; 26-fóvea; 27-esclera; 28-coróide; 29-músculo recto superior; 30-retina.

O globo ocular é formado por três camadas concêntricas sucessivas: a camada externa, a esclera; a camada média, constituída pela coróide, corpo ciliar e a íris; e a camada interna, a retina (Figura 1.3).

1.1.1 Camada Externa, Esclera

A camada mais externa, a esclera (vulgo *branco do olho*), é uma firme camada branca, opaca nos seus cinco sextos posteriores, composta por um tecido denso em colagénio e elastina, que tem como principais funções a manutenção da forma do globo ocular, protecção do conteúdo intra-ocular e servir de suporte para as inserções dos músculos extra-oculares. O sexto anterior, a córnea, é a parte saliente e transparente do globo ocular, protuberante e visível (Figuras 1.3 e 1.4). A curvatura da córnea não é esférica; tem uma superfície tórica, isto é, na direcção vertical tem uma curvatura ligeiramente mais acentuada do que na direcção horizontal. A córnea cobre a câmara anterior, e é aquela que mais contribui para o poder refraccional total do olho, com um valor fixo de cerca de 44 dioptrias*. É portanto um elemento de suma importância no sistema dióptrico do aparelho visual, porque com a sua acentuada curvatura é o principal meio que faz com que os raios paralelos se converjam na fóvea^{[6][7]}.

***Dioptria:** unidade de medida, d (m^{-1}), que afere o poder de refração de um sistema óptico. A dioptria é o inverso da distância focal DF , sendo esta metade do raio de curvatura, R : $d = 1/DF = 2/R$.

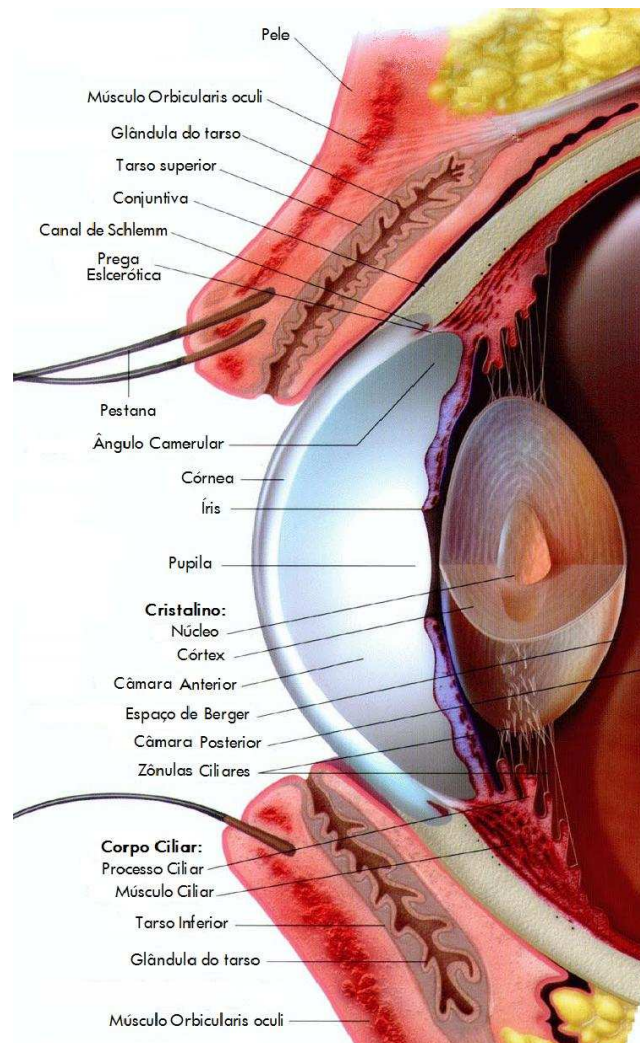


Figura 1.4 – Diagrama de um corte sagital da parte anterior do olho humano (adaptado de *Eye Poster* de 1999 da *Anatomical Chart Co.*).

1.1.2 Camada Média: Coróide, Corpo Ciliar e Íris

A camada média, vascular ou úvea, situada entre a esclera e a retina, é composta pela coróide, corpo ciliar e íris. A coróide estende-se desde o nervo óptico à ora serrata, e tem como principal função nutrir e fornecer oxigénio à retina (Figuras 1.3 e 1.6). Na extremidade posterior do globo ocular, à volta do orifício escleral posterior (o qual permite a entrada do nervo óptico) encontra-se a entrada das artérias ciliares posteriores. Estes vasos ramificam-se progressivamente formando uma intrincada rede de arteríolas, capilares e veias que continuam em frente passando o equador do olho até à ora serrata. A coróide tem uma grande concentração do pigmento escuro melanina que confere a “escuridão” à câmara posterior, condição fundamental para a visão. A melanina, entre outros pigmentos, absorve a luz, ajudando assim a limitar a reflexão descontrolada que poderá resultar em imagens desfocadas e confusas e que também é responsável pelo efeito *red-eye* em fotografias^{[7][8]}.

Após a ora serrata, a rede vascular adquire uma porção muscular lisa conhecida como o músculo ciliar, sendo a superfície interna desta área de aparência rugosa devido à presença dos processos ciliares. O conjunto destes dois elementos é conhecido como o corpo ciliar (Figuras 1.4, 1.5 e 1.6). Há três tipos de músculos ciliares (longitudinal, radial e circular) acima e abaixo do cristalino com o qual se ligam por via

da zônula de Zinn, e têm a função de regular o processo de acomodação do cristalino para focar a luz na retina. Por sua vez, os processos ciliares são responsáveis pela produção activa de humor aquoso.

A seguir ao corpo ciliar, antes de atingir o limbo córneo-escleral, desprende-se do corpo ciliar uma delicada membrana que deixa de estar aderida à esclera e, flectindo para o centro, forma a íris (Figura 1.6). A íris é uma membrana de forma circular responsável por controlar a quantidade de luz que passa através da abertura circular no seu centro, chamada de pupila, até chegar à câmara posterior. A íris é uma estrutura contráctil constituída por dois grupos de músculos lisos em redor da pupila; um grupo circular, *sphincter pupillae*, que diminui a pupila em ambientes de muita luminosidade (miose), e um grupo radial, *dilatator pupillae*, que aumenta a abertura da pupila em situações de pouca luz (midríase). Podendo apresentar as colorações castanho, verde e azul, a íris é uma estrutura fortemente pigmentada, bloqueando assim a passagem da luz através dela, restringindo esta à pupila^{[6][7]}.

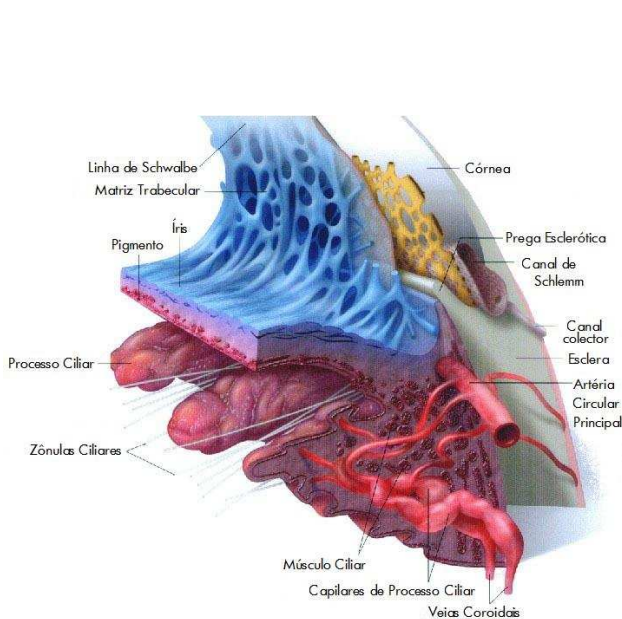


Figura 1.5 – Detalhe do corpo ciliar e formação da íris (adaptado de *Eye Poster* de 1999 da *Anatomical Chart Co.*).

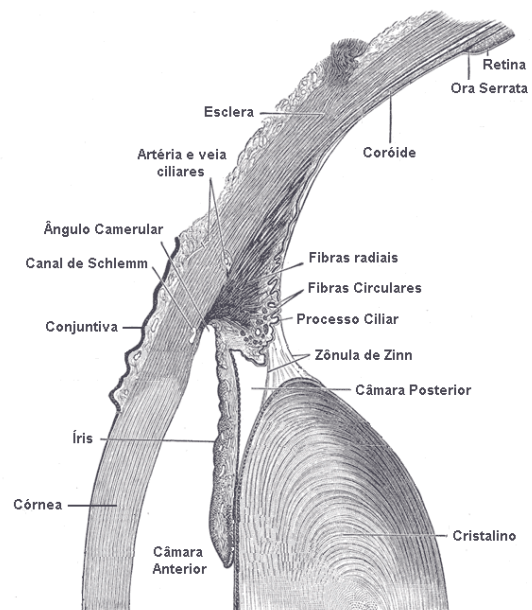


Figura 1.6 – Vista sagital do olho com ênfase para o corpo ciliar (adaptado de *Gray's Anatomy*).

1.1.3 Camada Interna: Retina

A camada mais interna, a retina, é a parte nervosa e principal responsável pela visão. Uma vez que a retina é um dos principais objectos de estudo deste trabalho, esta será apresentada em maior detalhe na secção 1.2.

1.1.4 Cristalino

Imediatamente atrás da íris, está situado o cristalino (Figura 1.7), uma lente elíptica, transparente, biconvexa e com um poder de refacção de aproximadamente 14 dioptrias que vai diminuindo com o avançar da idade, que, a par da córnea, ajuda a refractar a luz de modo a focá-la na retina.

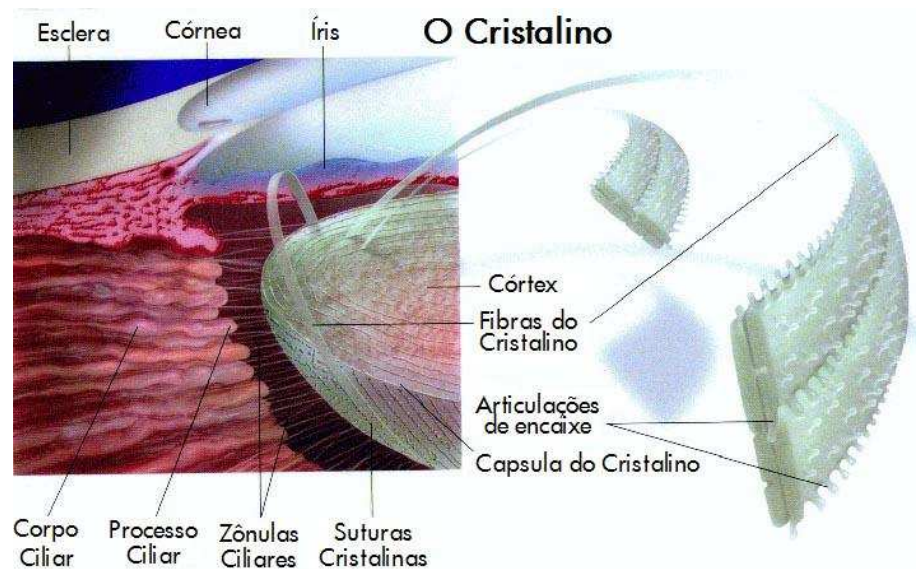


Figura 1.7 – O cristalino (adaptado de *Eye Poster* de 1999 da *Anatomical Chart Co.*).

O cristalino é flexível, e a sua curvatura é controlada pelos músculos ciliares pelo processo conhecido como a acomodação, permitindo assim alterar a distância focal do olho de modo a poder focar objectos em todas as distâncias, e obter imagens nítidas sobre a retina (Figura 1.8). O cristalino está suspenso pelos ligamentos ciliares que o ligam ao corpo ciliar, e é constituído por células organizadas longitudinalmente que perdem os seus organelos durante a formação, assumindo assim a sua transparência. A sua formação é feita a partir do seu centro, onde a adição de células se mantém durante toda a vida, embora o faça a um ritmo cada vez mais lento. Desta maneira, o centro do cristalino é a zona mais antiga e é onde as células se encontram mais separadas da distribuição de oxigénio e nutrientes provocando assim a sua morte. Quando as células morrem, endurecem, e o cristalino torna-se mais duro dificultando assim a sua capacidade de acomodação^{[6][7]}.

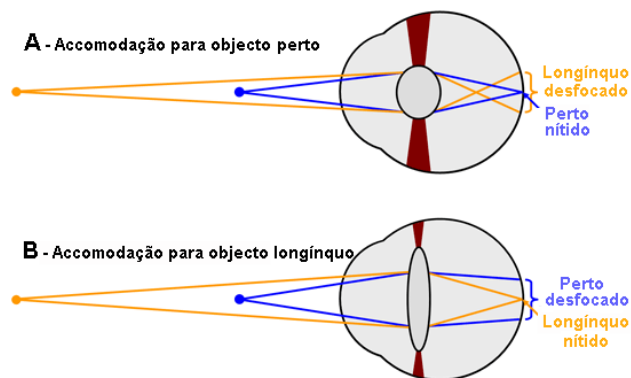


Figura 1.8 – A acomodação do cristalino (adaptado de [7]).

1.1.5 Câmara Anterior

A córnea e o cristalino delimitam o espaço conhecido como a câmara anterior que está preenchida pelo humor aquoso, uma substância semi-líquida e incolor maioritariamente composta por água (98%). O humor aquoso é produzido na câmara posterior nos processos ciliares a taxa constante de, aproximadamente, 3 ml por dia, fluindo depois pelo estreito espaço entre o cristalino e a íris até passar pela pupila para chegar à câmara anterior, onde a drenagem é realizada no ângulo camerular para o

canal de Schlemm. Entre as principais funções desta substância está a manutenção da pressão intraocular que garante a curvatura convexa da córnea, o fornecimento de oxigénio e nutrientes às estruturas avasculares (como a córnea e o cristalino) e a eliminação dos resíduos dos metabolismos destes mesmos tecidos^{[6][7]}.

1.1.6 Câmara Posterior

Do lado posterior do cristalino, entre este e a retina, está um volume relativamente grande mais conhecido por câmara posterior. Este espaço está preenchido pelo humor vítreo, uma transparente e gelatinosa substância também ela maioritariamente composta por água. É fundamental para conservar a forma esférica do globo ocular, tal como manter a retina correctamente posicionada ao mantê-la encostada contra a coróide. Ao contrário do humor aquoso, que tem segregação constante, o vítreo, na câmara posterior, é sedentário. Assim sendo, se algum sangue, detrito celular ou inflamação infiltrar o humor vítreo, estes apenas poderão ser removidos de forma cirúrgica^[7].

1.2 A Retina

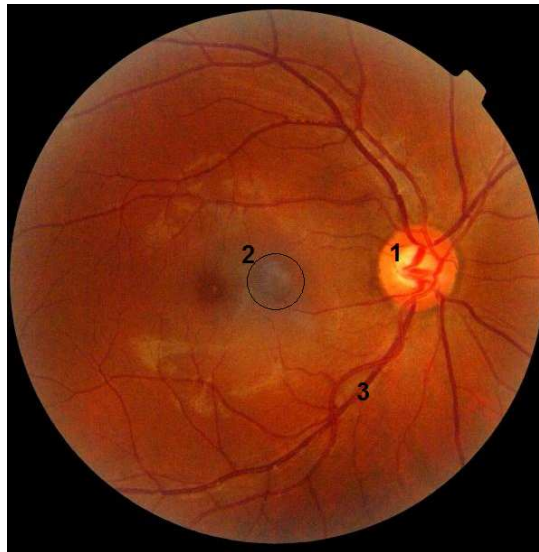


Figura 1.9 – Retinografia: 1-Disco óptico ('ponto cego'); 2-Mácula; 3-Artéria (adaptado de *National Eye Institute*).

A retina é um tecido fotosensível que reveste cerca de $\frac{3}{4}$ da superfície interna do globo ocular e é essencial para a percepção visual. Encontra-se premeida contra a coróide pela pressão intraocular do humor vítreo e está apenas aderida ao globo ocular nas suas margens anteriores e pelo disco óptico.

1.2.1 Disco Óptico

O disco óptico é a zona da retina onde o nervo óptico entra no globo ocular, e é também conhecido como o “ponto cego” devido à ausência de fotorreceptores nesta zona (Figura 1.9). Na embriogénese, a retina e o nervo óptico desenvolvem-se como prolongamentos do cérebro e, portanto, a retina é actualmente considerada como constituinte do sistema nervoso central (SNC), tendo a particularidade de

ser a única parte do SNC que pode ser observada de forma não-invasiva. Assim, a retina é uma parte especializada do cérebro que se tornou sensível à luz ao mesmo tempo que mantém a típica função das células nervosas de fazer a comunicação entre os receptores e o nervo óptico.

O nervo óptico, de forma tubular, é um conjunto de fibras nervosas mais a artéria e veia central da retina, que se forma por convergência das cerca de 1,2 milhões de axónios das células ganglionares ao nível da retina, e tem o papel de conduzir as imagens captadas pela retina e fóvea para o córtex visual do cérebro^{[6][7]}.

1.2.2 Mácula

No sentido temporal em relação ao nervo e disco óptico, próximo do centro da retina, está uma região oval e fortemente pigmentada, a mácula (Figura 1.9). Tem um diâmetro de aproximadamente 5 mm e do ponto de vista histológico tem duas ou mais camadas de células ganglionares. A sua pigmentação amarela permite-lhe absorver o excesso de luz que entra na câmara posterior actuando como uns óculos de sol naturais^[6].

1.2.3 Fóvea

No centro da mácula, no eixo óptico, está a fóvea, o pequeno local onde se dá o encontro focal dos raios paralelos que penetram no olho para formar a imagem do objecto com grande precisão e nitidez. A fóvea constitui uma depressão na topologia da retina (Figura 1.10) e, com uma grande concentração de fotorreceptores cones, é a região especializada para a visão de alta resolução, aplicada no acto da leitura, por exemplo. No centro da fóvea, está a foveola, onde apenas estão presentes cones, praticamente não havendo fotorreceptores bastonetes, o que permite que a luz atinja os cones sem passar pelas demais camadas da retina, maximizando assim a acuidade visual. Comparativamente com o resto da retina, os cones da fóvea central têm um diâmetro menor o que lhes permite uma organização mais compacta num padrão hexagonal, e é esta elevada densidade espacial de cones que é directamente responsável pela qualidade de imagem na fóvea. Outro factor que contribui para este fenómeno é a proporção entre células ganglionares e fotorreceptores de aproximadamente um, ou seja, quase todos os fotorreceptores têm apenas uma célula ganglionar a receber a sua informação havendo assim uma perda de informação e detalhe praticamente nula. Apesar de ocupar menos que 1% da área total da retina, a fóvea é responsável por mais de metade das fibras do nervo óptico e conseqüentemente do córtex visual do cérebro.

Na periferia da fóvea estão todos os neurónios que foram deslocados do seu centro, tornando assim este anel periférico a zona mais elevada da retina. A partir deste anel periférico e em direcção às margens da retina, os bastonetes vão gradualmente aparecendo em maior concentração mas, por outro lado, a densidade absoluta de fotorreceptores (cones e bastonetes) diminui progressivamente.

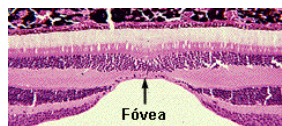


Figura 1.10 – Corte da fóvea (adaptado de Washington University School of Medicine *Neuroscience Tutorial*/1997).

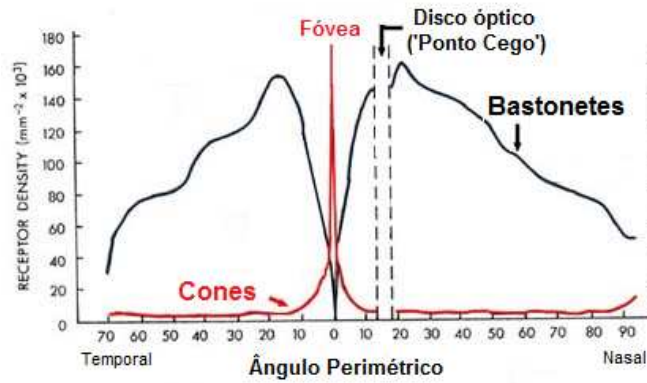


Figura 1.11 – Distribuição dos fotorreceptores na retina (adaptado de Osterberg 1935^[9]).

Excluindo a mácula e a fóvea, a restante área da retina é conhecida como retina periférica e caracteriza-se por uma menor espessura e maior concentração de bastonetes em relação aos cones (Figura 1.11). Por este motivo, a retina periférica está associada à detecção de movimentos, sombras, objectos e formas bem conhecidos, isto é, a visão periférica, bem como a visão nocturna e em ambientes escuros^{[6][7]}.

1.3 Camadas da Retina

A retina é um tecido complexo altamente organizado em várias camadas de neurónios interligados entre si por sinapses, normalmente descrita como tendo dez camadas diferentes. Da mais exterior para a mais interior, estas são (Figura 1.12):

- o epitélio pigmentado da retina (EPR);
- a camada de fotorreceptores;
- a membrana limitante externa (MLE);
- a camada nuclear externa (CNE);
- a camada plexiforme externa (CPE);
- a camada nuclear interna (CNI);
- a camada plexiforme interna (CPI);
- a camada de células ganglionares (CCG);
- a camada de fibras nervosas (CFN);
- e a membrana limitante interna (MLI).

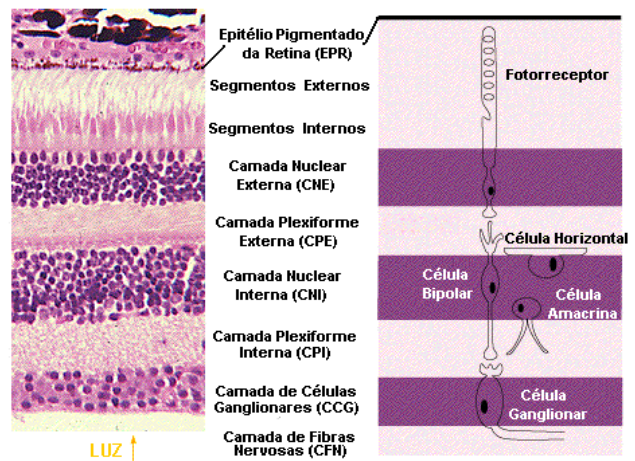


Figura 1.12 – Histologia da retina com respectivo diagrama simplificado (adaptado de Washington University School of Medicine *Neuroscience Tutorial* 1997).

De uma forma genérica, as camadas nucleares escuras contêm os corpos celulares e respectivos núcleos, ao passo que as camadas plexiformes, mais claras e de natureza sináptica, são compostas por axónios e dendrites.

1.3.1 Camada de Fotorreceptores, Membrana Limitante Externa, Camada Nuclear Externa e Camada Plexiforme Externa

Os fotorreceptores têm um segmento interno e um segmento externo que se situam ambos na camada de fotorreceptores propriamente dita, enquanto os seus núcleos constituem a camada nuclear externa, atravessando, entretanto, a membrana limitante externa (Figura 1.13). A porção mais anterior dos fotorreceptores são os seus axónios e respectivos corpos sinápticos, e encontram-se na camada plexiforme externa. É nesta zona sináptica que é feita a comunicação dos impulsos nervosos dos axónios dos fotorreceptores, com as dendrites das células bipolares (orientação vertical) e das células horizontais^[7].

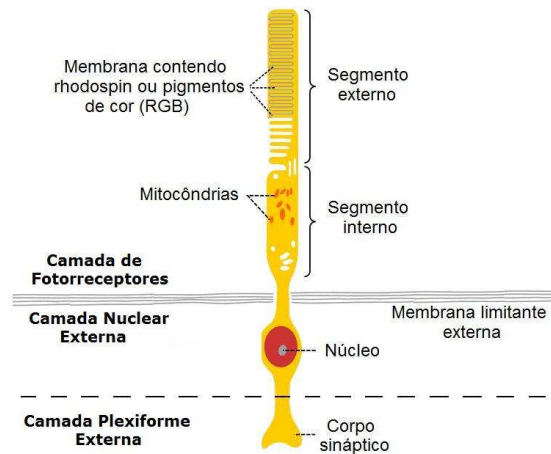


Figura 1.13 – Diagrama das diferentes estruturas dum fotorreceptor (neste caso um bastonete), e as várias camadas sobre as quais se estende (adaptado de [10]).

1.3.2 Camada Nuclear Interna

A camada nuclear interna é composta pelos núcleos das células bipolares e células horizontais. As células bipolares servem essencialmente de ponte entre os fotorreceptores, na sua extremidade externa, e as células ganglionares, na sua extremidade interna. Podem estabelecer ligações de sinapse com cones ou bastonetes, mas não ambos, e também podem fazê-los com as células horizontais. As células horizontais são neurónios de interligação horizontal que ajudam a integrar e regular o sinal vindo dos fotorreceptores, estando simultaneamente ligadas entre si, e a células bipolares ou fotorreceptores^[7].

1.3.3 Camada Plexiforme Interna

Continuando no sentido de transmissão dos impulsos nervosos (posterior para anterior) tem-se a camada plexiforme interna, área composta por um denso reticulado de fibras entrelaçadas dos axónios das células bipolares, e das dendrites das células ganglionares em especial. É bastante mais espessa do que a camada plexiforme externa e tem ainda a particularidade de conter as células amacrinas. Estas células amacrinas funcionam de forma semelhante às células horizontais modulando a actividade das células ganglionares bem como a das células bipolares. Existem mais do que trinta diferentes tipos de células amacrinas embora elas sejam distinguidas em relação à sua forma ou neurotransmissor em detrimento da sua função^[7].

1.3.4 Camada de Células Ganglionares e Camada de Fibras Nervosas

A camada de células ganglionares é composta pelos núcleos das células ganglionares que podem receber a informação visual tanto de células bipolares como de células amacrinas. Com base nas suas funções, tamanho, ligações e resposta à estimulação visual, existem pelo menos cinco tipos de células ganglionares diferentes, mas todas partilham duma propriedade característica que é a de terem um longo axónio que se prolonga até ao cérebro. Estes axónios também têm a particularidade de serem transparentes para permitir que a luz chegue aos fotorreceptores, e, portanto, não possuem bainha de mielina até atingirem o disco óptico. A rede de axónios das células ganglionares, e suas ramificações, constitui a camada de fibras nervosas que acaba por convergir no disco óptico onde passa a formar o chamado nervo óptico^[7].

1.3.5 Membrana Limitante Interna

A membrana limitante interna, formada por astrócitos e células Müller, é a camada mais interna de todas e constitui a barreira entre o humor vítreo e a retina. É ainda caracterizada por ser muito fina e lisa, o que contribui para a sua elevada reflectância em relação às restantes camadas^[7].

1.3.6 Epitélio Pigmentado da Retina e Membrana de Bruch

Na extremidade oposta, posterior à retina, tem-se o epitélio pigmentado da retina (EPR), que, com apenas uma única camada de células hexagonais, faz a barreira entre a retina e a coróide. Estas são células com grande concentração de grânulos pigmentares (melanina), especialmente na mácula, e daí deriva a sua cor negra, importante na tarefa de absorver a luz que chega em excesso que deterioraria a qualidade de imagem. Esse excesso de luz é convertido em calor que é dissipado pelo amplo fluxo de sangue através da coróide. Quando analisadas em secção, cada célula revela uma parte externa não-pigmentada com um grande núcleo oval, e uma parte interna com pigmentação que se estende em finos processos filiformes por entre os bastonetes (Figura 1.14).

A isolar o EPR da coróide está uma fina membrana de 2-4 μ m chamada de membrana de Bruch através da qual o EPR transporta resíduos metabólicos para a coróide. É nesta membrana que se formam as drusas, estruturas essas que poderão estar na origem da degeneração macular relacionada com a idade (DMRI)^[7].

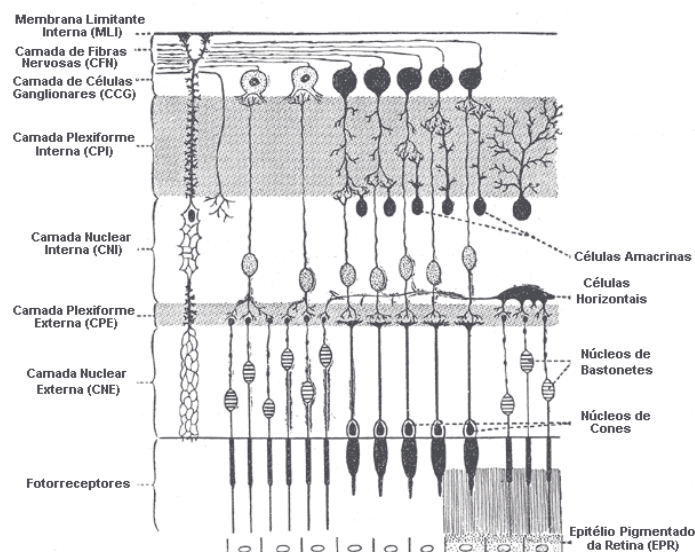


Figura 1.14 – Ilustração das camadas da retina com as respectivas células (adaptado de *Gray's Anatomy*)

Nesta estrutura histológica da retina, as células ganglionares (os neurónios de *output* da retina) são as mais internas da retina, mais próximas do cristalino e da câmara anterior, enquanto os fotorreceptores, os únicos neurónios directamente sensíveis à luz, são os mais externos, imediatamente antes do epitélio pigmentado da retina e da coróide. Assim sendo, a luz tem que atravessar toda a espessura da retina para atingir e activar os fotorreceptores.

1.4 Fotorreceptores: Cones e Bastonetes

Os fotorreceptores são neurónios altamente especializados para a fototransdução, processo que consiste na captação de fótons, e conversão dessa informação numa alteração do potencial eléctrico da membrana.

Existem dois tipos de fotorreceptores diferentes, nomeadamente: os cones, preponderantes na visão diurna e na diferenciação cromática, e os bastonetes, importantes em ambientes escuros e na visão a “preto-e-branco”.

As principais características de cones e bastonetes estão resumidas na Tabela 1.

Característica	Cones (visão cromática)	Bastonetes (visão ‘preto-e-branco’)
Forma	Cónica	Alongada e cilíndrica
Número	~5 milhões	~100 milhões
Distribuição	Por toda a retina, mas concentrada na fóvea	Ausência no centro da fóvea, mas concentrada no exterior desta
Luminosidade para desempenho óptimo	Boa iluminação	Iluminação deficiente, penumbra
Acuidade	Excelente	Fraca
Sensibilidade	Fraca	Excelente
Adaptação ao escuro	Rápida	Lenta
Fotopigmento	3 – para diferentes c.d.o (Short (azul), Medium (verde) e Long (vermelho))	1 – Rhodospin
Número relativo para cada célula ganglionar receptora (convergência)	Baixo (≈ 1)	Elevado

Tabela 1.1 – Características de cones e bastonetes (adaptado de *Sensation & Perception* de Foley e Matlin, e [11]).

É de salientar que os fotorreceptores não detectam cor. Os cones captam a informação relativa ao comprimento de onda (c.d.o.) e à intensidade, o que faz com que um cone apenas não consiga definir a cor; para isto, o sistema visual compara as respostas duma população de fotorreceptores, com maior relevo para os três tipos de cone com espectros de absorção correspondentes às cores azul, verde e vermelho. Para determinar a intensidade, é calculada a quantidade activa de cada um destes grupos de fotorreceptores^[11].

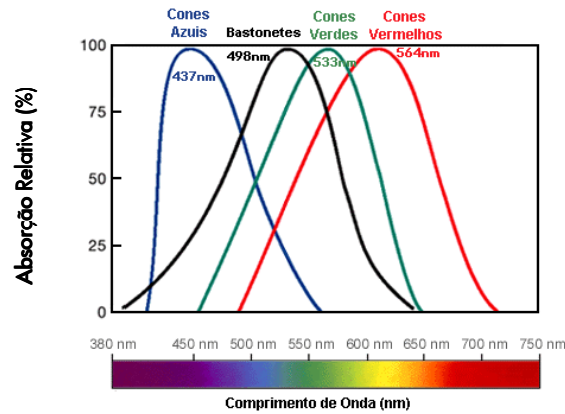


Figura 1.15 – A sensibilidade dos fotorreceptores ao comprimento de onda (adaptado de [5]).

Da Figura 1.15 é de notar que, o pigmento dos bastonetes, o rhodospin, é mais sensível a comprimentos de onda menores que os cones verdes e vermelhos cujos comprimentos de onda protagonizam a luz do dia.

Neste trabalho, para uma primeira aproximação da estrutura da retina, foram considerados apenas três camadas: a mais interna de todas, a MLI, a mais externa de todas, o EPR, e pelo meio considerou-se uma única camada nuclear que engloba todas as células neuronais, e seus axónios e dendrites, desde os fotorreceptores às células ganglionares. Esta simplificação apresenta as características mínimas da composição e estrutura de cada uma destas camadas e a forma como interagem com os fótons para os fenómenos de absorção, reflexão e transmissão.

Capítulo 2 Degeneração Macular

2.1 Degeneração Macular Relacionada com a Idade - DMRI

Apesar do facto da degeneração macular relacionada com a idade (DMRI) ser a principal causa oficial da perda de visão agravada e cegueira em pessoas com mais de cinquenta anos nos países desenvolvidos, é ainda uma patologia da qual pouco se sabe.

A DMRI é definida como uma doença crónica e degenerativa que destrói gradualmente a área central da retina, a mácula, devido à acumulação de materiais extracelulares, incidindo especialmente sobre a população acima dos cinquenta anos. Além da deterioração da visão central, um dos sintomas mais comuns da DMRI é o aparecimento de drusas na retina.

Alguns factores de risco de desenvolver a DMRI são^{[12][13]}:

- a idade: o risco aumenta com o envelhecimento;
- história familiar de DMRI;
- sexo: as mulheres são mais susceptíveis de vir a desenvolver a doença;
- fumar;
- dieta, especialmente quando há um défice de minerais e vitaminas antioxidantes;
- excesso de exposição solar;
- tensão sanguínea elevada;
- obesidade e excesso de peso.

Existem dois tipos de DMRI: a DMRI seca e a DMRI húmida, com ambas a ocorrer sobre a mácula deteriorando assim a visão central. Por esta razão, uma pessoa com DMRI nunca ficará totalmente cega uma vez que ainda terá visão periférica. É possível que um doente sofra dos dois tipos de DMRI, que seja afectada apenas num, ou em ambos os olhos, e que a doença progrida de forma rápida ou lenta.

2.2 DMRI seca

A DMRI seca é a forma mais comum da degeneração macular sendo responsável para 85% a 90% dos casos diagnosticados. Normalmente ambos os olhos são afectados embora seja possível que ocorra apenas num. Numa etapa inicial, a DMRI seca vai-se desenvolvendo com o aparecimento de drusas entre o epitélio pigmentado da retina e a membrana de Bruch que serão ainda assintomáticas. A sucessiva acumulação de drusas passa a deteriorar a camada acima, o epitélio pigmentado da retina, acabando por danificar a camada de fotorreceptores resultando em pontos cegos ou desfocados na área da visão central (Figura 2.1). Com o avanço da doença, mais células de EPR e fotorreceptores são destruídas contribuindo para o aumento do número e tamanho das drusas o que leva ao aparecimento de mais e maiores pontos cegos (Figura 2.2)^{[12][13]}.

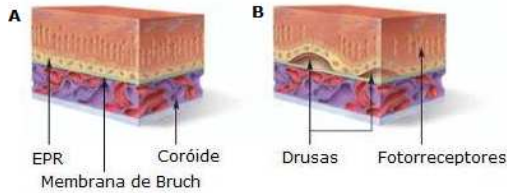


Figura 2.1 – Secção de uma mácula normal (A), e uma com drusas (B). (adaptado de [12])



Figura 2.2 – Simulação de uma visão normal (A), e outra com pontos cegos devido à existência de drusas (B) (adaptado de [12]).

Com o agravamento da doença, a possibilidade de se desenvolver para a forma mais severa de DMRI húmida aumenta significativamente; cerca de 43% de doentes com DMRI seca avançada poderão passar à forma húmida no espaço de cinco anos^[14].

2.3 DMRI húmida

Esta forma de degeneração macular mais severa recebe o seu nome devido à existência de sangue nas camadas mais profundas da retina. Num processo chamado neovascularização coroidal (NVC), vasos sanguíneos novos, e anormais, começam-se a desenvolver espontaneamente por baixo da retina. Simultaneamente, a membrana de Bruch vai-se deteriorando por acção das drusas acabando os novos vasos sanguíneos por penetrar na retina. Sendo ainda fracos, estes novos vasos deixam escapar algum conteúdo sanguíneo dentro da retina que separa e levanta outras camadas como uma bolha. Este processo acaba por danificar os fotorreceptores de uma forma rápida e irreversível ao ponto de não conseguirem transmitir os sinais visuais ao cérebro.

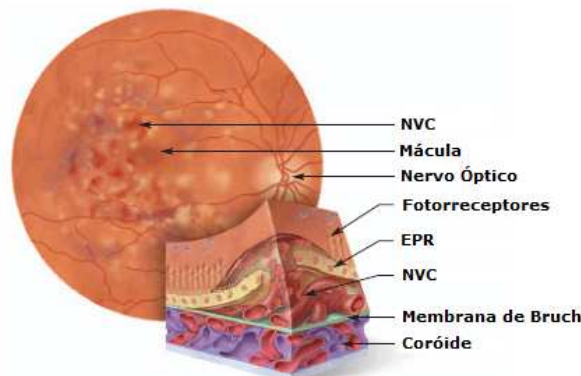


Figura 2.3 – Ilustração de uma retina sofrendo de DMRI húmida, e uma secção da mácula retratando o processo da doença (adaptado de [12]).

De acordo com o padrão de NVC presente na retina, existem vários tipos de DMRI húmida com diferentes sintomas visuais como a metamorfopsia (distorção), a scotoma (ponto cego central) e a perda de sensibilidade ao contraste.



Figura 2.4 – Simulação de uma visão normal (A) e (D), visão com distorção devido a metamorfopsia (B), visão com ponto cego central devido a scotoma (C) e visão de baixo contraste (E) (adaptado de [12]).

Embora a DMRI húmida possa surgir de forma espontânea, é normalmente precedida pela DMRI seca. A DMRI húmida é mais grave mas não é tão frequente sendo responsável por 10% a 15% de todos os casos de degeneração macular^{[12][13]}.

2.4 Drusas

As drusas são acumulações muito pequenas, amarelas ou brancas, de material extracelular resultante do metabolismo que se aglomeram atrás da retina, entre o epitélio pigmentado da retina e a membrana de Bruch. A presença de algumas drusas pequenas ('duras') é normal com o avançar da idade e, a maior parte da população acima dos quarenta terá algumas drusas 'duras'. No entanto, a presença de drusas maiores ('moles') e em maior número, na mácula, é um indicador comum da degeneração macular relacionada com a idade (DMRI). Se são as drusas em si que originam a DMRI, ou se são apenas sintomáticas de um processo subjacente que as produz, e causa a DMRI, ainda não se sabe ao certo, mas apontam para um risco acrescido de vir a desenvolver a DMRI. Existem vários elementos traço nas drusas sendo o zinco aquele com maior concentração^[7].

Ao envelhecer, a membrana de Bruch torna-se mais espessa, atrasando o transporte de metabolitos da coróide para o EPR, o que poderá levar à formação das drusas na DMRI. Existe também uma acumulação de depósitos na membrana (Basal Linear Deposits, BLinD, e Basal Lamellar Deposits, BLamD) maioritariamente constituídos por fosfolípidos, e que aparenta ser mais concentrada na mácula do que na retina periférica. Este acumular de depósitos desfragmenta a membrana de Bruch numa estrutura lamelar e folhada em vez de constituir uma barreira. Esta nova estrutura é propícia para que mediadores inflamatórios e neovasculares influenciem o crescimento de vasos coroidais para dentro, e além, desta membrana, destruindo assim a arquitectura da crucial retina externa, culminando com a perda da visão central, i.e., a degeneração macular^[7].

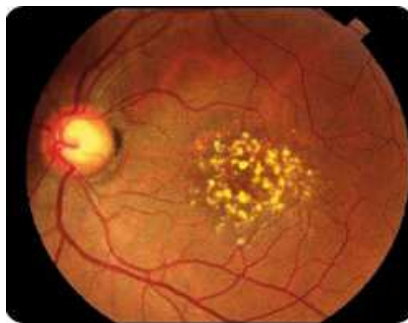


Figura 2.5 – Retinografia mostrando a presença de vários pontos amarelos, as drusas (adaptado de [14]).

2.4.1 Detecção de Drusas

Actualmente o diagnóstico da existência de drusas pode ser feito de forma manual ou automática, embora estas técnicas ainda não estejam muito divulgadas devido à dificuldade de se encontrar métodos com a sensibilidade e especificidade adequadas.

O modo manual consiste em detectar visualmente e avaliar qualitativamente as manchas de drusas presentes em imagens da retina obtidas através de técnicas de retinografia como a fotografia de fundus, varrimento laser ou angiografia.

O modo automático tem vindo a ser melhorado desde o aparecimento do primeiro trabalho importante de detecção automática não supervisionada de manchas de drusas em imagens de retinografia de Peli e Lahav em 1986^[2]. Este tipo de detecção limita-se às drusas duras, mas permite uma análise menos subjectiva e mais quantitativa e qualitativamente correcta^[5].

No presente trabalho estuda-se a viabilidade de desenvolver uma técnica capaz de indentificar a existência de drusas utilizando o modo indirecto e simulações de Monte Carlo. Este método consiste em fazer incidir um feixe de fotões num ponto da retina e analisar a distribuição da luz reflectida em redor do ponto de incidência. O objectivo é conseguir inferir a estrutura interna da retina através da análise desta distribuição e assim poder identificar a presença de estruturas anómalas no seu interior.

Capítulo 3 Processos Estocásticos

3.1 Processos Estocásticos

Um processo estocástico, também conhecido como acontecimento aleatório, é o contrário dum processo determinístico. Em vez de se lidar com apenas uma possível realidade de como o processo poder-se-á desenvolver, num processo estocástico existe uma indeterminação quanto à sua progressão futura que é descrita por distribuições de probabilidade. Assim, mesmo que se conheçam as condições iniciais, existem várias possibilidades para o desfecho, sendo algumas mais prováveis que outras.

Uma possível definição de processo estocástico é a seguinte^[15]:

Um processo estocástico $x(t)$ refere-se a um conjunto de variáveis aleatórias, $\{x(t), t \in J\}$, indexado a outra variável, t , pertencente ao conjunto J .

Assim, um processo estocástico é uma função de dois parâmetros: o tempo, t , e o resultado de uma experiência aleatória ξ , e o seu estudo deve-se à existência do conceito de variável aleatória que varia no tempo. Ao parâmetro t costuma-se atribuir o significado de tempo, mas não tem que ser necessariamente assim; este parâmetro pode ter outro significado como o número de vezes que se repete o acontecimento aleatório.

Dependendo da natureza do conjunto J , existem diferentes classificações de um processo estocástico:

- Se J contém um número finito de valores, e.g. $J = \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$, diz-se que o processo estocástico é de parâmetro discreto.
- Se J puder assumir qualquer valor num dado intervalo, e.g. $J = \{t : -\infty < t < +\infty\}$, é considerado um processo estocástico de parâmetro contínuo.

3.2 Variáveis Aleatórias

Uma variável aleatória é a concretização, ou resultado, de um processo estocástico. Em qualquer acontecimento aleatório, não se pode saber o valor da variável aleatória, mas sabe-se que valores possivelmente tomará, e com que probabilidade. Com base nesta informação, embora não seja possível prever o resultado de um único ensaio associado a esta variável aleatória, é possível prever com alguma precisão o resultado global de um grande número de ensaios.

À semelhança dos processos estocásticos, e mais precisamente devido ao próprio processo estocástico a que está associada a variável aleatória, esta poderá também ser natureza discreta ou contínua^[16].

3.2.1 Variáveis Aleatórias Discretas

A variável aleatória X diz-se discreta se puder assumir qualquer valor de um conjunto discreto $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. X define-se então da seguinte forma:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & p_3 & \dots & p_n \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

onde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são os valores possíveis da variável X , e $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ são as respectivas probabilidades. Os valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são arbitrários, mas as suas probabilidades $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ têm que satisfazer as seguintes condições^[16]:

1. todas as probabilidades p_i são não-nulas, $p_i \geq 0$; (3.2)

2. a soma de todas as probabilidades p_i é um, $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. (3.3)

3.2.2 Variáveis Aleatórias Contínuas

Uma variável aleatória X é dita contínua se puder assumir qualquer valor num intervalo $[a, b]$. Uma variável aleatória contínua X define-se com a atribuição de uma função $p(x)$ ao intervalo $[a, b]$ que contém os valores possíveis que a variável pode tomar, e à função $p(x)$ dá-se o nome de densidade de probabilidade ou distribuição de densidade da variável X .

A definição da função $p(x)$ é a seguinte:

Seja $[a', b']$ um intervalo arbitrário contido em $[a, b]$, i.e. $a' \geq a$ e $b' \leq b$. Assim, a probabilidade de que X está contida no intervalo $[a', b']$ é igual ao integral

$$P(a' < X < b') = \int_{a'}^{b'} p(x) dx. \tag{3.4}$$

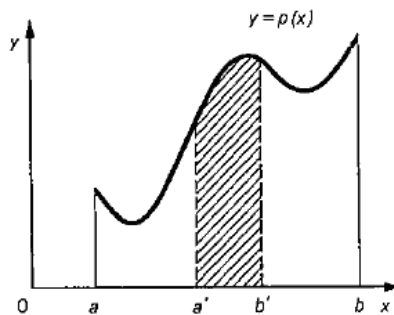


Figura 3.1 – Exemplo duma função de densidade de probabilidade $p(x)$ para um intervalo $[a', b']$ (adaptado de [16]).

Tal com as variáveis aleatórias discretas, também as contínuas podem estar contidas num intervalo qualquer. A densidade $p(x)$, porém, terá que obedecer a duas condições análogas as referidas para as variáveis discretas^[16]:

1. a densidade $p(x)$ é não-nula,

$$p(x) \geq 0; \tag{3.5}$$

2. o integral da densidade $p(x)$ sobre todo o intervalo $[a, b]$ é igual a um,

$$\int_a^b p(x) dx = 1. \tag{3.6}$$

3.2.3 Distribuição Uniforme

Na teoria probabilística, a distribuição de probabilidades contínua mais simples é a distribuição uniforme $U_{[a,b]}$, definida no intervalo $[a, b]$ e com uma densidade

$$p(x) = \frac{1}{b-a} \quad \text{para } a < x < b. \quad (3.7)$$

Para pontos fora do intervalo $[a, b]$, $p(x) = 0$. Nesta distribuição, $U_{[a,b]}$, a probabilidade de se gerar qualquer ponto num intervalo contido no espaço da amostra é proporcional ao comprimento do intervalo, e todos os intervalos com o mesmo comprimento têm a mesma probabilidade^{[7][16]}.

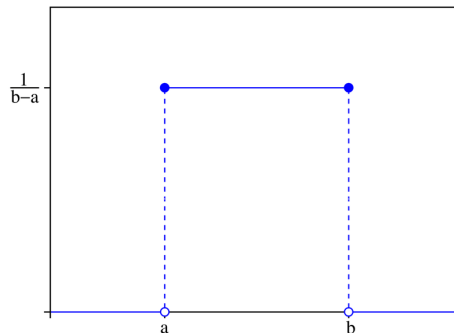


Figura 3.2 – Função densidade de probabilidade para uma distribuição uniforme (adaptado de [7]).

3.2.4 Distribuição Normal (ou Gaussiana)

Além da distribuição uniforme, outra das distribuições contínuas mais comuns e com grande aplicabilidade é a distribuição normal ou gaussiana. Esta distribuição é utilizada para caracterizar uma variável aleatória que se concentra em torno de um valor médio, representado com um máximo no respectivo gráfico em forma de sino.

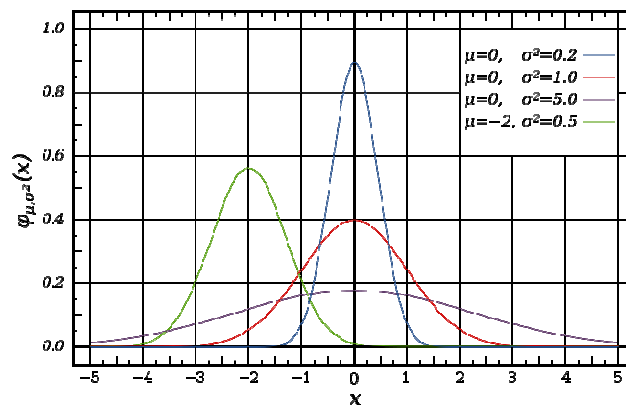


Figura 3.3 – Função densidade de probabilidade para quatro distribuições normais com diferentes parâmetros de média (μ) e desvio padrão (σ) (adaptado de [7]).

A função densidade de probabilidade de uma distribuição normal é dada pela expressão

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3.8)$$

onde μ é o valor médio, e $\sigma > 0$ é o desvio padrão, valor associado à largura da curva^{[7][16]}.

3.3 Geração de Variáveis Aleatórias

A utilização de variáveis aleatórias não deve ser encarada como uma forma de disponibilizar uma descrição perfeita de fenômenos naturais, mas sim como uma ferramenta para resolver problemas particulares de interesse.

Consideram-se três principais formas distintas de gerar variáveis aleatórias: tabelas de variáveis aleatórias, geradores de variáveis aleatórias e o método de gerar variáveis pseudo-aleatórias. Focar-se-á este último método uma vez que é aquele que foi utilizado na realização deste trabalho.

Os vários campos de aplicação de variáveis aleatórias deram origem a inúmeras formas de as gerar, variando na sua imprevisibilidade e velocidade com que são geradas. Se esta última qualidade é de fácil avaliação, a primeira é feita com testes estatísticos específicos para o efeito. Assim sendo, desde que a aleatoriedade satisfaça os referidos testes, torna-se indiferente a forma ou método utilizado para gerar as variáveis aleatórias, e até se pode equacionar uma fórmula para as obter. Um gerador de variáveis pseudo-aleatórias define-se assim como um algoritmo que imita as propriedades de uma variável aleatória uniforme. A sequência de valores produzidos não é verdadeiramente aleatória uma vez que é completamente determinada por um conjunto de parâmetros iniciais relativamente pequeno. Embora seja possível conseguir sequências “mais aleatórias”, o método pseudo-aleatório é aquele que é aplicado na esmagadora maioria de simulações por Monte Carlo porque:

- a) requerendo apenas algumas simples operações, a velocidade de geração de variáveis está na mesma ordem daquela do processamento do computador;
- b) a simplicidade do algoritmo permite-lhe ocupar pouco espaço na memória do computador;
- c) e a sua qualidade apenas necessita de ser verificada uma vez, podendo depois ser extensivamente aplicado sem medo de erro.

As principais desvantagens são a falta de uniformidade da distribuição, correlação de valores sucessivos, uma periodicidade aquém do esperado para alguns parâmetros iniciais e, principalmente, um número limitado de variáveis aleatórias que se pode gerar^[16].

3.4 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é definido como uma classe universal de algoritmos computacionais utilizados para a resolução aproximada de problemas físicos e matemáticos através da simulação de quaisquer acontecimentos influenciados por fenômenos aleatórios.

O nome, “método de Monte Carlo”, surgiu pela primeira vez em 1949 num artigo de Metropolis e Ulam^[17] e deve-se à cidade de Monte Carlo, no principado de Mônaco, famosa pelo seu casino, onde um dos mais simples dispositivos para a geração de números aleatórios é a roleta. Porém, os princípios básicos deste método há muito que se conhecem, e desde o século XIX que se resolviam problemas estatísticos com a ajuda de acontecimentos aleatórios, isto é, na verdade, através do método de Monte Carlo. Mas o sortear de valores aleatórios com base em instrumentos rudimentares revelou-se um processo muito demorado, o que levou ao abandono desta técnica, e foi só com o desenvolvimento de computadores

electrónicos e a simulação computacional que o método de Monte Carlo ganhou popularidade como uma técnica veloz para a amostragem estatística em larga escala afim da resolução de problemas físicos e matemáticos, que de outra forma seriam inviáveis.

A simulação computacional adquire uma importância cada vez maior na ciência moderna por fazer a ponte entre as previsões teóricas e os resultados experimentais. Mas as simulações não procuram apenas conseguir resultados perfeitamente sincronizados com a experimentação e a teoria, mas sim de compreender melhor as características de cada fenómeno secundário e a influência que este terá no resultado global. Isto é conseguido controlando as condições experimentais do modelo e da possibilidade de examinar cada aspecto da configuração do sistema em pormenor. Assim, outra vantagem das simulações é a de que diferentes efeitos físicos que actuam simultaneamente no sistema poderem ser isolados e considerados separadamente. É possível 'ligar' e/ou 'desligar' os efeitos de cada factor e determinar assim as suas consequências particulares, culminando com um conhecimento fino e detalhado do problema a ser estudado.

O algoritmo computacional do método de Monte Carlo consiste, essencialmente, em gerar um processo estocástico. Este processo é repetido N vezes, com cada ensaio a ser independente dos outros, sendo depois calculada a média dos resultados de todos os ensaios. Devido à semelhança com a experiência científica, o método de Monte Carlo é por vezes chamado de *o método de ensaios estatísticos*, e é aplicado quando a resolução por um algoritmo determinístico se revela inviável ou mesmo impossível.

A simulação pelo método de Monte Carlo é especialmente útil para a modelação de acontecimentos com uma incerteza considerável dos valores de entrada (*input*) e no estudo de sistemas com um grande número de graus de liberdade. Dito isto, o método pode ser usado em inúmeros ramos da ciência variando os seus graus de sofisticação para cada problema em concreto para achar a aplicação mais conveniente e eficaz. Numa simulação por Monte Carlo tenta-se seguir a dependência temporal de um modelo no qual a sua evolução não ocorre de forma rigorosamente pré-definida, mas sim de um modo estocástico que depende da sequência de números aleatórios que é gerada. Para diferentes sequências, a simulação não dará resultados idênticos, mas, dentro de alguns erros estatísticos, os resultados serão concordantes a longo prazo.

No entanto, nem todos os problemas são solucionados por Monte Carlo, porque nem sempre fornece valores que se encaixam dentro de limites razoáveis. Um obstáculo comum na implementação deste método continua a ser as limitações temporais. Apesar de todos os benefícios conseguidos pelos computadores, estes ainda têm limites de velocidade de processamento e de memória que não satisfazem alguns problemas mais ambiciosos. A qualidade de programação é também um factor que influencia o tempo de processamento que será tanto menor quanto melhor for a programação tirando assim o proveito máximo das limitações físicas do computador. Outra característica de uma simulação a ter em conta é a exactidão pretendida, o que também depende da profundidade com que o modelo é desenvolvido. O método de Monte Carlo, ao contrário de muitas outras técnicas analíticas, tem a grande vantagem de diminuir os erros e incertezas estatísticas simplesmente deixando correr a simulação durante mais tempo o que permite aumentar o número de amostras. O erro associado à simulação é dado por

$$Erro = \sqrt{\frac{D}{N}} \quad (3.9)$$

onde D é uma constante e N é o número de repetições. Fica assim claro que, aumentando as repetições, N , por um factor de 100, consegue-se um erro atenuado por um factor de $10^{[16]}$.

Capítulo 4 Conceitos Físicos

4.1 Índice de Refracção

O índice de refração é uma propriedade física, constante em condições padrão, que caracteriza um determinado meio por uma medida da redução da velocidade da luz (ou outro fenómeno ondulatório, como o som) nesse meio.

O índice de refração, n , dum meio, é definido como a razão da velocidade, c , de um fenómeno ondulatório como a luz ou o som num meio de referência, e a velocidade, v , no meio em questão:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.1)$$

O índice de refração é normalmente aplicado à luz tendo como meio de referência o vácuo, onde a velocidade de propagação de toda a radiação electromagnética é de 299792458 metros por segundo (aproximadamente 3×10^8 m/s)^[18]. O valor do índice de refração é tipicamente superior à unidade; quanto maior o índice de refração, maior é o decréscimo da velocidade da luz no meio.

Uma onda de luz incidente numa interface de dois meios com diferentes índices de refração sofre os fenómenos de reflexão e refração^[19].

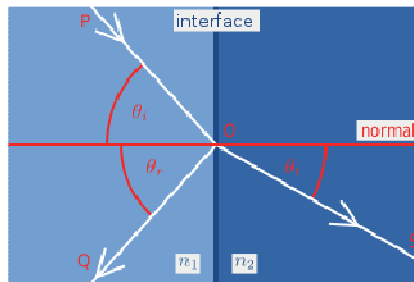


Figura 4.1 – Um raio incidente PO incide sobre a interface entre dois meios de índice de refração n_1 e n_2 no ponto O. Parte do raio é reflectido no raio OQ e outra parte é refractada no raio OS. Os ângulos que os raios incidente, reflectido e refractado fazem com a normal à interface são θ_i , θ_r e θ_t , respectivamente (adaptado de Josh Lee 2007^[7]).

4.2 Reflexão

A reflexão define-se como a mudança de direcção de uma frente de onda numa interface de dois meios diferentes, de tal modo que, a frente de onda retorna para o meio do qual originou. Segundo a “Lei da Reflexão”, nos casos de reflexão especular, o ângulo de reflexão θ_r é igual ao ângulo de incidência θ_i : $\theta_i = \theta_r$. A fracção de potência incidente que sofre reflexão na interface é dada pela reflectância, R , e a fracção que é refractada é dada pela transmitância, T . A determinação dos valores de R e T depende da polarização da luz incidente. Se a luz estiver polarizada com o campo eléctrico da luz perpendicular ao plano da Figura 4.1 (polarização s), a reflectância R é dada por:

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 \quad (4.2)$$

Se a luz incidente estiver polarizada no plano da Figura 4.2 (polarização p), a reflectância R é dada por:

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 \quad (4.3)$$

A transmitância T é dada, conseqüentemente por $T_s = 1 - R_s$, ou por $T_p = 1 - R_p$. (4.4)

Caso a luz incidente não for polarizada, tendo uma proporção igual de polarizações s e p, a reflectância total R resultará de uma média simples das duas componentes R_s e R_p , i.e. ^{[7][19]}:

$$R = \frac{(R_s + R_p)}{2}. \quad (4.5)$$

4.3 Refracção

A refração define-se como a mudança de direcção de uma frente de onda devido a uma mudança da sua velocidade ocorrendo normalmente numa interface entre dois meios com índices de refração diferentes. Na fronteira entre os dois meios, a velocidade da onda é alterada, resultando numa mudança de direcção. O comprimento de onda aumenta ou diminui, mas a frequência permanece constante. Um raio que incida na perpendicular alterará a sua velocidade mas não a sua direcção, não sendo por isso que deixa de ocorrer o fenómeno de refração neste caso particular.

A mudança de direcção é descrita pela "Lei de Snell":

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{v_i}{v_t} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.6)$$

ou

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (4.7)$$

onde v_i e v_t são as velocidades nos respectivos meios de incidência e refração (também referido por meio de transmissão), e n_i e n_t são os respectivos índices de refração ^{[7][19]}.

4.4 Coeficientes de Absorção e Dispersão

Quando um feixe de partículas (fótons ou outras partículas materiais) penetra num dado material, cada partícula sofre uma sucessão de interacções com os átomos do material e, em cada interacção, podem ocorrer duas situações:

- a) a partícula é absorvida pelo átomo e conseqüentemente desaparece do feixe;
- b) a partícula é dispersa, continuando o movimento numa direcção diferente da inicial com a mesma energia, caso a interacção seja elástica, ou com energia diferente caso a interacção seja inelástica.

Como não é possível actualmente seguir deterministicamente o que acontece a cada partícula, é associada a cada tipo de interacção (a) e b)) uma probabilidade de ocorrência. Para partículas materiais (eléctron,

protão, neutrão, etc.), a probabilidade de uma partícula ser absorvida ou dispersa numa interacção é descrita pelas respectivas secções eficazes:

- secção eficaz de absorção σ_a ,
 - secção eficaz de dispersão σ_s ,
 - e secção eficaz total $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$.
- (4.8)

As probabilidades de absorção, p_a , e dispersão, p_s , são respectivamente definidas por

$$p_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_t} \quad (4.9)$$

e

$$p_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_t}. \quad (4.10)$$

No caso de fótons, a absorção e dispersão é descrita pelo:

- coeficiente de absorção, μ_a ,
 - coeficiente de dispersão, μ_s ,
 - e o coeficiente de interacção total, $\mu_t = \mu_a + \mu_s$.
- (4.11)

Considere-se um meio de profundidade finita em que incide um feixe de fótons como está representado na Figura 4.2.

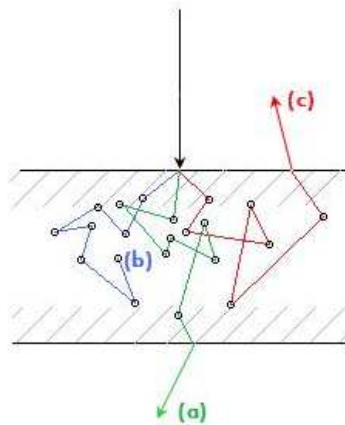


Figura 4.2 – Três possíveis ocorrências para a interacção de um fóton incidente sobre um meio de espessura finita: a) transmissão; b) absorção; c) reflexão (adaptado de Santos^[20]).

Poderão ocorrer três situações diferentes^[20]:

- a) o fóton atravessar o meio e sair na fronteira oposta à de entrada;
- b) o fóton atravessar o meio até uma certa profundidade e ser absorvido, desaparecendo do feixe;
- c) o fóton ser reflectido e sair do meio através da fronteira por onde entrou.

4.5 Anisotropia

A anisotropia é uma propriedade que descreve a dependência direccional.

Em 1941, Henyey e Greenstein^[21] propuseram a seguinte função de distribuição de probabilidade para a dispersão galáctica:

$$p(\cos\theta) = \frac{1-g^2}{2(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (4.12)$$

onde o ângulo α define o desvio do raio da direcção frontal; g é o factor de anisotropia, uma medida adimensional da simetria da função e que corresponde à média da função $\cos\theta$, i.e. $g = \langle \cos\theta \rangle$, variando no intervalo $[-1;1]$. Para $g = 0$, tem-se uma distribuição isotrópica da dispersão, e $g = 1$ indica que toda a dispersão é na direcção frontal. Na figura 4.3 estão representados os diagramas de dispersão para os casos $g = 1/3$ e $g = 2/3$.

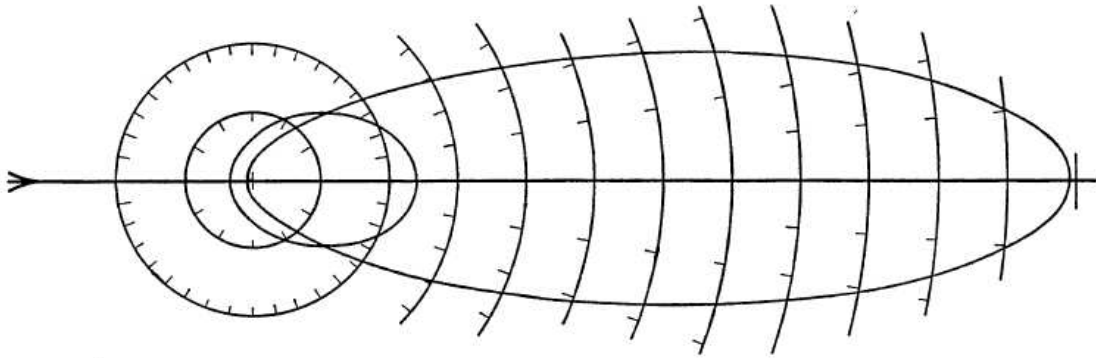


Figura 4.3 – Diagrama polar da função distribuição de probabilidade da equação 5.8. A elipse maior é para $g = 2/3$, e a elipse menor para $g = 1/3$. A radiação incide na partícula da esquerda como indica a seta (adaptado de Vitkin e Côté^[22]).

Jacques et al.^[23] mostraram experimentalmente que a função Henyey-Greenstein descreve a dispersão em tecido de forma correcta. Para tecidos, os valores de g variam entre 0,3 e 0,98, mas no espectro visível têm um valor de cerca de $\sim 0,9$ ^[24].

Capítulo 5 Reflectividades

O método mais utilizado para observar e estudar o fundo ocular é de iluminá-lo através da pupila e analisar a luz reflectida. Com o objectivo de interpretar melhor, e tirar mais, e melhores conclusões dos resultados desta técnica, há que conhecer melhor o fenómeno que lhe é subjacente, a reflexão da luz no fundo ocular e todos os processos nela envolvidos, e é com esse intuito que se desenvolveu este presente trabalho.

A luz reflectida pelo fundo ocular deve-se principalmente à reflexão na retina, coróide e esclera, e as suas propriedades dependem da resposta do tecido em questão, que, por sua vez, depende do comprimento de onda da luz incidente, a região do fundo a ser iluminado e o próprio sujeito^[25]. Dos três tecidos acima referidos, a retina é a mais complicada por ser composta por várias camadas, cada uma com a sua própria constituição e, conseqüentemente, reflectividade. Na retina, as camadas que apresentam maior reflectividade são a membrana limitante interna, camada de fibras nervosas e epitélio pigmentado da retina.

5.1 Membrana Limitante Interna - MLI

A primeira camada da retina com que a luz interage é a membrana limitante interna, e segundo Gorrard (1986)^[26], a fracção de luz que sofre reflexão especular nesta membrana pode chegar a um terço do total da luz reflectida. Esta elevada reflectividade deve-se à superfície lisa da membrana, e à diferença de índices de refração entre o humor vítreo e a retina que assim dita a ocorrência de reflexão especular, R_{sp} , definida de acordo com a seguinte expressão:

$$R_{sp} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (5.1)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração do meio ambiente e da primeira camada respectivamente.

É de salientar que esta foi a única interface de meios na retina em que foi considerada a hipótese de reflexão especular visto que não foram registadas diferenças de índices de refração entre as camadas constituintes.

5.2 Retina (excluindo o epitélio pigmentado da retina - EPR)

Depois da membrana limitante interna, a luz interage com a camada de fibras nervosas cuja reflexão foi estudada por Knighton et al. (1989, 1992)^{[27][28]}. Aqui, a reflexão deve-se principalmente à dispersão de Rayleigh* nos microtúbulos e neurofilamentos que são pequenos em comparação com o comprimento de onda. As camadas nucleares interna e externa também poderão contribuir para a reflexão total da retina. Tendo atingido a camada de fotorreceptores, a luz adquirirá uma direcionalidade devido à interacção com os segmentos exteriores dos fotorreceptores.

***Dispersão de Rayleigh:** (em homenagem ao físico inglês Lord Rayleigh) é a dispersão elástica da luz visível, ou outro tipo de radiação electromagnética, por parte de partículas muito menores que o comprimento de onda dos fótons^[7].

A Figura 5.1 mostra o espectro de reflexão, absorção e transmissão medido por Hammer et al. (1995)^[29] de toda a retina excluindo o epitélio pigmentado da retina.

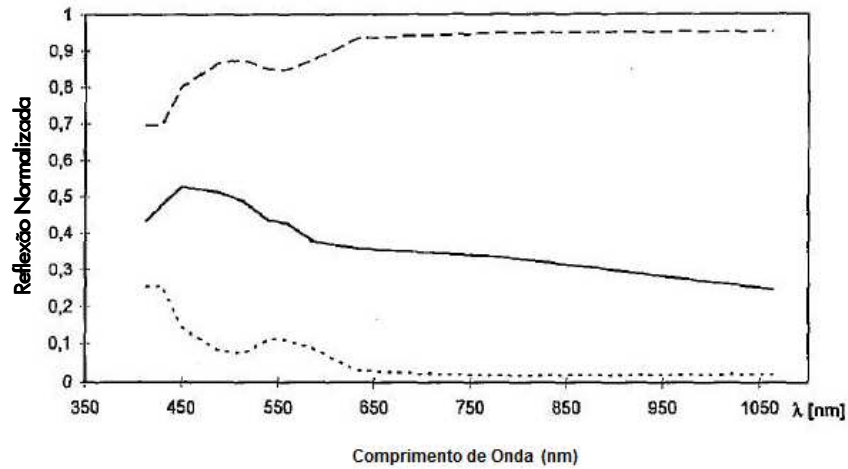


Figura 5.1 – Características espectrais de uma retina bovina com 200 μm sem o epitélio pigmentado da retina conseguidos por Hammer et al. 1995^[29]. Linha contínua – 10x reflexão; linha tracejada – transmissão; e linha pontilhada – absorção.

5.3 Epitélio Pigmentado da Retina - EPR

A próxima camada de interesse é o epitélio pigmentado da retina, que, segundo Hammer et al. (1995)^[29], apresenta um coeficiente de absorção quase tão elevado como o de dispersão para comprimentos de onda inferiores a 650 nm (Figura 5.2).

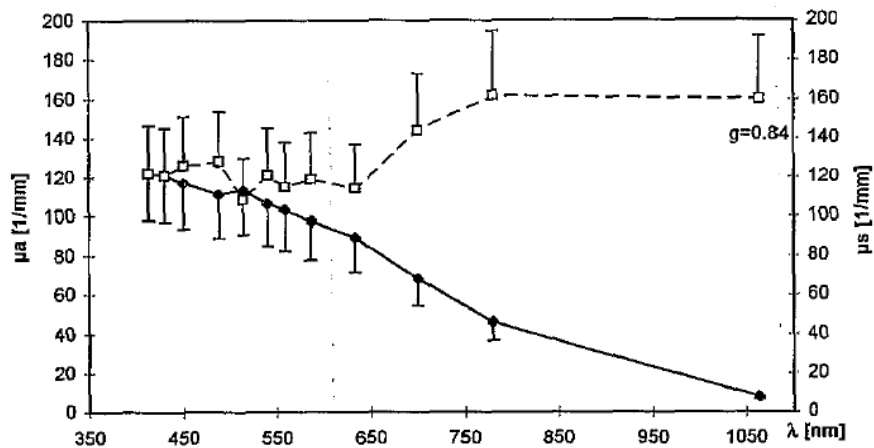


Figura 5.2 – Coeficientes de absorção e dispersão dum epitélio pigmentado da retina bovina obtidos por Hammer et al. (1995)^[29].

Bülow (1968)^[30] concluiu que a dispersão dá-se nos grânulos pigmentares. No epitélio pigmentado da retina, estes grânulos são aproximadamente dez vezes maiores do que os grânulos de outros tecidos humanos pigmentados^[31], justificando assim os elevados coeficientes de absorção obtidos por Hammer et al. (1995)^[29]. Assim, apesar da sua diminuída espessura (ver Capítulo 1.3.6), o epitélio pigmentado da retina é o tecido de maior absorção do globo ocular. Na Figura 5.3, conseguida por Hammer et al. (1995)^[29], mostra-se o espectro de reflexão do epitélio pigmentado da retina onde se verifica um aumento da reflexão com o comprimento de onda.

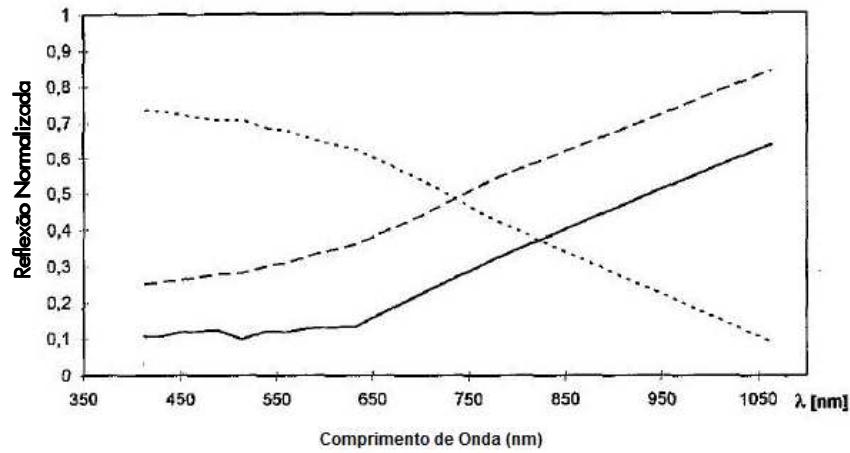


Figura 5.3 – Características espectrais de um epitélio pigmentado da retina bovino com 10 μm conseguidos por Hammer et al. (1995)^[29]. Linha contínua – 10x reflexão; linha tracejada – transmissão; e linha pontilhada – absorção.

5.4 Coróide

A coróide é a camada onde é mais difícil obter valores de reflectividade, absorção e transmissão. Dada a sua natureza capilar, o seu conteúdo sanguíneo pode variar bastante, entre 30% a 70%, o que complica bastante a concretização de medidas objectivas, mas, por outro lado, é esperado que as características da coróide sejam muito semelhantes às do sangue^[29].

5.5 Esclera

A esclera é tida como o último importante reflector do fundo ocular humano atingindo uma reflectividade máxima de quase 70%. A aparência branca da esclera deve-se a um coeficiente de dispersão muito superior ao coeficiente de absorção (Figura 5.4), ocorrendo essa dispersão na desordenada e densa malha de fibras de colagénio^[32] que têm um diâmetro médio de 60 nm^[33] e um índice de refração de $n = 1,47$ versus $n = 1,36$ do meio em que estão envolvidos^[34].

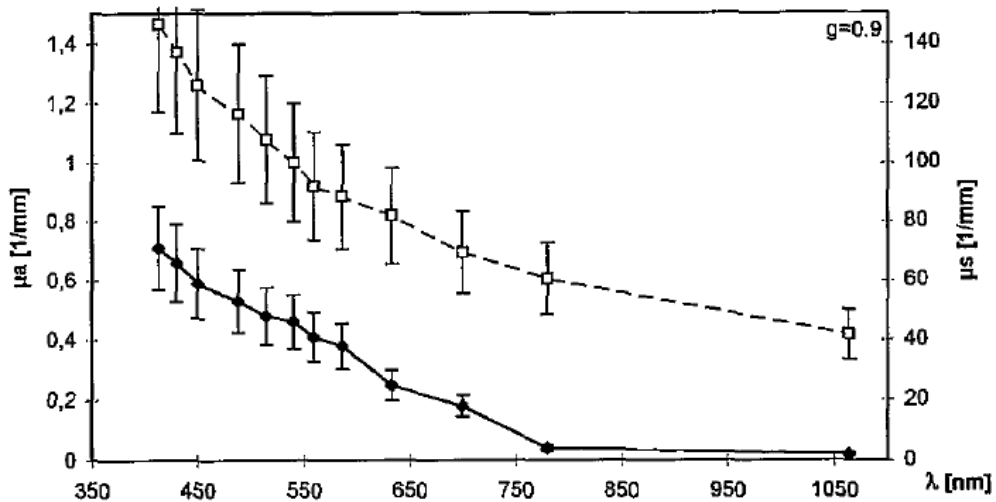


Figura 5.4 – Coeficientes de absorção e dispersão da esclera bovina obtidos por Hammer et al. (1995)^[29].

A Figura 5.5 mostra os espectros de reflexão, absorção e transmissão da esclera conseguidos por Hammer et al. (1995)^[29]. Apesar da elevada reflectividade desta camada, a sua contribuição para a reflectividade total do fundo ocular é muito baixa, devido às camadas anteriores com as quais a maior parte da luz já sofreu reflexão, absorção ou dispersão.

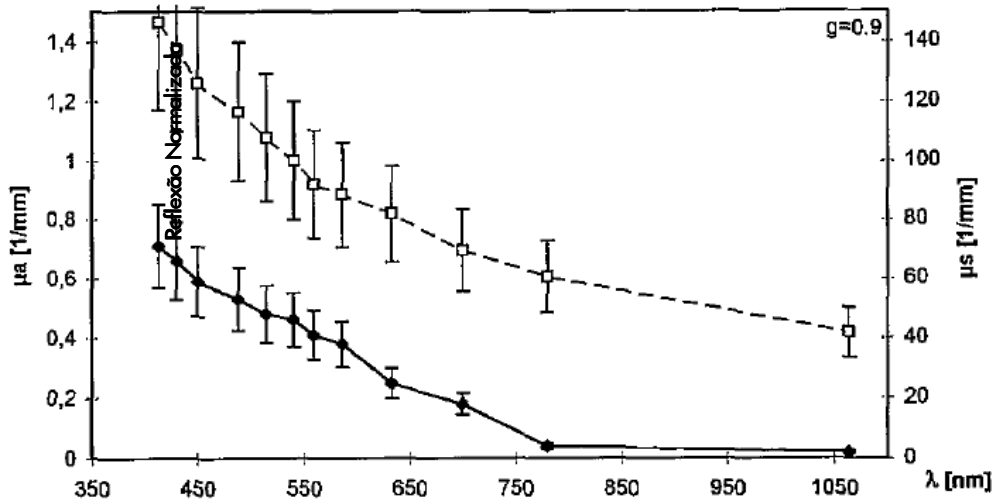


Figura 5.5 – Características espectrais de uma esclera bovina com 700 μm conseguidos por Hammer et al. (1995)^[29]. Linha contínua – reflexão; linha tracejada – transmissão; e linha pontilhada – absorção.

5.6 Fundo Ocular Humano *in vivo*

A Figura 5.6 mostra o espectro de reflexão *in vivo* de um fundo ocular humano, temporal ao disco óptico, medido por Hammer et al. (1993)^[35] onde é possível concluir que a reflexão aumenta com o comprimento de onda, e que há mínimos relativos para 540 nm e 575 nm explicados pela absorção de oxihemoglobina. Acima dos 1200 nm não há reflexão por causa do espectro de absorção da água, o principal constituinte do humor vítreo. Para comprimentos de onda entre 550 nm e 1200 nm, o humor vítreo apresenta uma transmissão de 80%^[36].

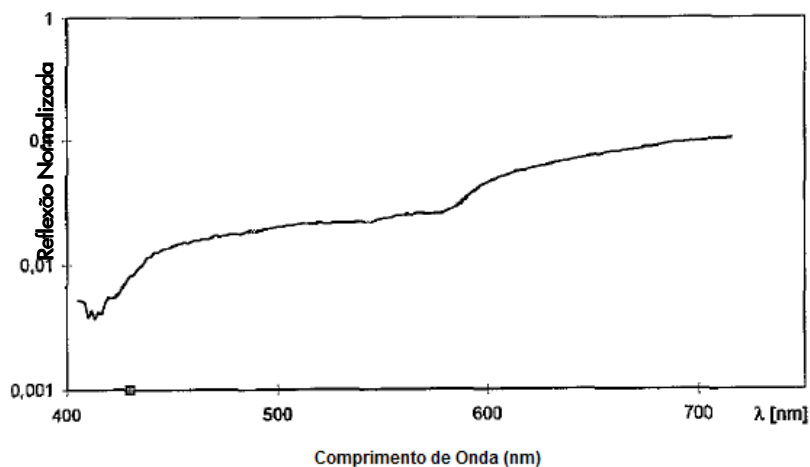


Figura 5.6 – Espectro de reflexão *in vivo* de um fundo ocular humano temporal ao disco óptico conseguido por Hammer et al. (1993)^[35].

Metodologia

- 6.0: Contextualização
- 6.1: Tradução para linguagem C
- 6.2: Desenvolvimento do modelo
- 6.3: O método MCML
- 6.4: Teste do código que implementa o método MCML
- 6.5: Aplicação do método MCML ao fundo ocular
- 6.6: Aplicação do modelo de matriz com alguns conceitos MCML

Capítulo 6 Metodologia

6.0 Contextualização

Este trabalho é a continuação de um projecto anteriormente iniciado por Maria Vasconcelos^[5], e como tal, far-se-á o ponto da situação aquando do começo deste presente trabalho.

Com o objectivo de simular por Monte Carlo as componentes anteriores e posteriores do olho humano com vista à compreensão da forma como a luz se propaga e interage com as diferentes estruturas do olho, foi construído um programa computacional em Matlab.

A principal estrutura do olho a ser estudada foi o fundo ocular, e este foi representado como uma matriz de três diferentes camadas constituídas por pontos deflectores que, em primeira aproximação, são os átomos da molécula de água por ser a maior constituinte dos tecidos biológicos.

As três camadas consideradas de forma a melhor traduzir a realidade reflectiva do fundo ocular são: a membrana limitante interna (MLI); a camada neuronal, (CN), que engloba a CFN, CCG, CPI, CNI, CPE, CNE, MLE e a camada de fotorreceptores (ver Capítulo 1.3); e o epitélio pigmentado da retina (EPR). Estas três camadas variam na sua espessura e densidade nesta primeira representação simplista (Figura 6.1).

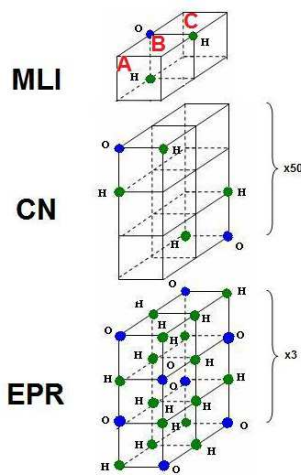


Figura 6.1 – As 3 matrizes construídas para as respectivas camadas.

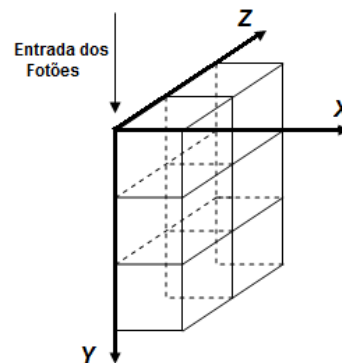


Figura 6.2 – Sistema de eixos adoptada para o presente trabalho.

Na propagação dos fótons no fundo ocular foram considerados os seguintes pressupostos:

- i. todos os fótons têm incidência normal sobre o fundo ocular;
- ii. a distribuição dos fótons à entrada da retina foi considerada como sendo gaussiana em torno da origem da matriz considerada;
- iii. a energia E , ângulo de propagação α , posição (x_1, y_1, z_1) e direcção de propagação (x_2, y_2, z_2) do fóton são actualizados de acordo com o deslocamento e colisão do fóton com os átomos da molécula de água;
- iv. o deslocamento é arredondado e limitado a apenas uma unidade de modo a garantir que o fóton esteja sempre num dos pontos da matriz, esteja este vazio, ou ocupado por um átomo (hidrogénio ou oxigénio), havendo neste último caso colisão;

- v. as alterações na direcção de propagação e energia dos fótons são obtidas tendo em conta a conservação da energia e do momento linear em cada colisão fóton-átomo, isto é, são consideradas dispersões de Compton;
- vi. todo o percurso de propagação dos fótons, independentemente de haver reflexão ou transmissão, é feita unicamente num plano bidimensional XY (A, B ou C) ;
- vii. foi imposto que não haveria alterações no vector da direcção de propagação vertical (y_2) nas primeiras duas camadas (MLI e CN), independentemente do seu sentido de propagação, por estas se limitarem a dispersar os fótons; assim, cingiu-se o fenómeno de reflexão à terceira e última camada, o EPR, por ser a mais reflectiva das três;
- viii. é de salientar que apenas foram efectuadas simulações no primeiro plano XY, o plano A.

Em resumo, cada fóton incide perpendicularmente na retina com uma posição obtida de forma aleatória segundo uma densidade de probabilidade gaussiana. Uma vez dentro da retina, o fóton mantém a sua direcção até sofrer uma interacção; então são actualizados os valores da sua energia, posição e direcção de propagação. Este processo repete-se até que a energia do fóton seja menor que um valor predefinido, ou que este abandone a retina por reflexão ou por transmissão, sendo registadas as coordenadas de saída da retina em vectores diferentes. Devido às dimensões finitas da matriz no plano XZ, existe ainda a possibilidade de extermínio do fóton por estar fora destes limites; a percentagem dos fótons exterminados é muito pequena em relação ao total de fótons simulados.

Recomeça-se então um novo ciclo para um novo fóton, tendo no final as coordenadas de saída de todos os fótons lançados.

Após terem sido obtidos resultados quanto à distribuição dos fótons reflectidos, foram introduzidas perturbações com diferentes composições, dimensões e posições na camada neuronal (CN) de modo a simular a presença de drusas e estudar o seu impacto na distribuição dos fótons reflectidos.

Na Figura 6.3 apresenta-se o fluxograma do código construído para a simulação da propagação de fótons na retina no método da matriz de pontos.

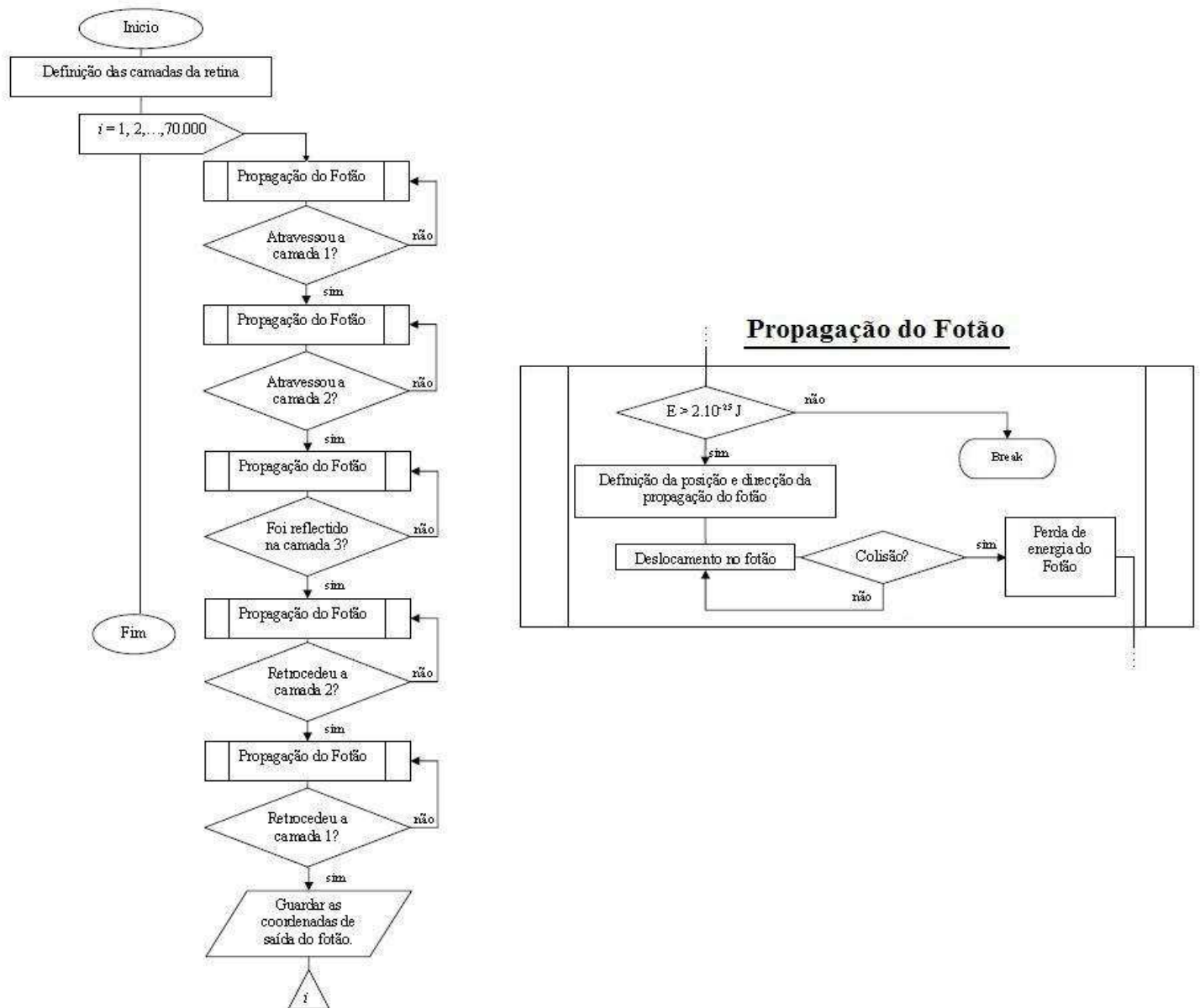


Figura 6.3 – Fluxograma para a propagação de fótons em tecidos compostos por várias camadas implementado no método da matriz de pontos.

6.1 Tradução para linguagem C

O primeiro passo do presente trabalho consistiu em estudar o projecto anterior, acima descrito, e reproduzir os resultados na linguagem de programação C. Para este efeito foi utilizado o *IDE* (Integrated Development Environment) multi-plataforma de livre acesso, Code::Blocks 8.02.

Nesta etapa, foram efectuadas algumas alterações ao código prévio, nomeadamente:

- De acordo com o ponto vi.) a propagação de um fóton manteve-se apenas no plano bidimensional XY, mas, passou-se a admitir propagações de fótons nos três planos XY possíveis, A, B e C, e não apenas no plano A como referia o ponto viii.). A distribuição dos fótons ao longo do eixo Z foi efectuada segunda a mesma gaussiana do eixo X, e tal como está referido no ponto ii).

- b) Uma consequência da alteração acima referida foi o alerta de que, no caso concreto de um fóton que se propagava no plano XY denominado B, quando entrasse na CN, a mais espessa das três com uma espessura de duzentas unidades, o fóton não sofria nenhuma colisão porque esta secção está desprovida de átomos. Assim, o fóton mantendo constantes os seus vectores de direcção de propagação (x_2, y_2) , deslocava-se sempre uma unidade na direcção do seu vector mais expressivo (y_2 , uma vez que foi esta deslocação vertical que permitiu a entrada na camada CN), e ignorando por completo o efeito cumulativo do vector de menor expressão (x_2). A alteração introduzida contabiliza precisamente esse efeito cumulativo do vector de menor expressão (x_2), resultando numa periodicidade com que o fóton se desloca uma unidade no sentido lateral, para além da constante unidade do vector de maior expressão. Esta alteração resultou numa amplitude de dispersão ligeiramente maior para os fótons que se transmitem através do fundo ocular, e ainda um pouco maior para os fótons reflectidos uma vez que sofrem este processo duas vezes: uma vez em direcção ao fundo posterior, e uma segunda vez no percurso de volta após ter sido reflectido na camada mais externa, o EPR.

Para garantir que o trabalho anterior estava correctamente traduzido para a linguagem C, reproduziram-se, com este novo código, todas as simulações que tinham sido efectuadas no trabalho inicial, nomeadamente:

- 9 Simulações variando o número de fótons à entrada (40.000, 50.000, 60.000, 70.000, 80.000, 90.000, 100.000, 500.000 e 1.000.000)
- 2 Simulações variando a espessura da camada CN para metade, e para o seu quadruplo (100 e 800)
- 2 Simulações substituindo toda a camada CN, primeiro por átomos de cálcio ($Z_{Ca}=20$), e depois por átomos de estanho ($Z_{Sn}=50$)
- 6 Simulações: 3 para uma drusa de cálcio com as dimensões 100x120, 12x40 e 12x20
3 para uma drusa de estanho com as dimensões 100x120, 12x40 e 12x20
- 4 Simulações: Deslocando uma drusa de cálcio 5 e 10 unidades no sentido negativo do eixo X
Deslocando uma drusa de estanho 5 e 10 unidades no sentido negativo do eixo X
- 4 Simulações com uma drusa vazia: Centrada
Deslocada 50 unidades no sentido negativo do eixo X
Deslocada 75 unidades no sentido negativo do eixo X
Deslocada 100 unidades no sentido negativo do eixo X

6.2 Desenvolvimento do Modelo

Tendo sido verificado o correcto funcionamento do novo código, o próximo passo consistiu em desenvolver o modelo de forma a traduzir melhor a realidade da propagação de fótons através do fundo ocular do olho humano.

O aumento da complexidade do modelo do presente trabalho foi abordado em duas vertentes: o desenvolvimento da matriz de pontos representativa do fundo ocular, e a progressiva introdução de mais conceitos físicos de modo a melhor descrever os fenómenos envolvidos na interacção de fótons com a matéria.

6.2.1 Desenvolvimento da Matriz

No estado ainda precoce deste trabalho, considerou-se que a matriz de pontos composta por apenas três camadas é satisfatória, e que ainda não havia motivos para aumentar a sua complexidade.

6.2.2 Desenvolvimento dos Conceitos Físicos

Em relação aos fenómenos físicos subjacentes à propagação de fótons na retina, houve várias melhorias sugeridas, nomeadamente:

- aleatoriedade da direcção de incidência dos fótons;
- coeficientes de dispersão (μ_s), coeficientes de absorção (μ_a) e coeficientes totais ($\mu_s + \mu_a = \mu_t$);
- índices de refração característicos de cada meio (n);
- a possibilidade da ocorrência de reflexão interna na passagem de um meio para outro;
- anisotropia característica de cada meio (g);
- um novo passo para o deslocamento de fótons;
- uma nova definição dos vectores direccionais em três dimensões;

A aleatoriedade da direcção de incidência dos fótons sobre o fundo ocular foi desnecessária devido à simetria esférica do globo ocular, e ao facto do aparelho visual concentrar os raios luminosos sobre a fóvea de modo a maximizar a precisão e a nitidez da visão. Considerou-se então razoável a aproximação da direcção de incidência dos fótons no fundo ocular a uma incidência normal.

Na progressiva introdução destes novos fenómenos físicos foi tido como referência principal o artigo "MCML – Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues" de Wang *et al.*^[36] (referido simplesmente como MCML) o qual descreve os conceitos aplicados na elaboração do seu programa computacional para a propagação de fótons na matéria já aprovado pela comunidade científica.

Contudo, apercebeu-se que havia algumas diferenças e incompatibilidades entre as duas abordagens. A principal divergência é a de que, enquanto o modelo do presente trabalho aborda a matéria como uma matriz de pontos deflectores com uma certa densidade, havendo colisão apenas se o fóton se encontrar numa posição ocupada por um átomo, o artigo MCML trata a matéria de forma macroscópica, considerando camadas homogéneas caracterizadas por propriedades ópticas como o índice de refração, factor de anisotropia e coeficientes de absorção e dispersão, e em que ocorre sempre o processo de colisão após o fóton percorrer o passo amostrado.

Uma vez compreendidas estas diferenças, optou-se por abandonar temporariamente o modelo de matriz e aplicar a abordagem MCML ao objecto de estudo do presente trabalho, o fundo ocular.

6.3 O método MCML

O método MCML fornece uma ferramenta flexível mas rigorosa para a propagação de fótons em tecidos permitindo registar simultaneamente várias grandezas físicas de interesse. Este método descreve regras locais para a propagação de fótons que se expressam sob a forma de distribuições de probabilidade que definem o passo de fótons entre locais de interacção fóton-tecido e os ângulos de deflexão aquando dum evento de dispersão. O MCML baseia-se em propriedades ópticas macroscópicas que se assume que se estendem sobre pequenas unidades de volume de tecido. Os fótons são considerados como partículas clássicas, e os fenómenos de polarização e de onda são desprezados.

O método MCML considera a propagação perpendicular de um feixe de fótons de largura infinitesimal sobre um tecido de número de camadas variável e paralelos entre si. Cada camada tem área infinita e é caracterizada pelos seguintes parâmetros: espessura, índice de refração, o factor de anisotropia, e os coeficientes de absorção e dispersão. Apesar das camadas nunca poderem realmente ter área infinita, podem ser assim consideradas uma vez que são muito maiores que a distribuição espacial dos fótons. Os índices de refração dos meios acima e abaixo do tecido em questão também são necessários. É usado um sistema de coordenadas cartesiano $[XYZ]$ para a posição, com o eixo Y a ser normal à superfície (XZ) e apontando para o interior do tecido, e um sistemas de coordenadas esféricas $[\theta, \psi]$ para a direcção de propagação do pacote de fótons. Os pacotes de fótons são descritos por um conjunto de parâmetros organizados numa estrutura definida por:

```
typedef struct {
    double x,y,z; /* Coordenadas cartesianas da posição (XYZ) */
    double x2, y2, z2; /* Cosenos directores da direcção de propagação */
    double W; /* Peso do pacote de fótons */
    double AnguloPolar, AnguloAzimutal; /* Ângulos de deflexão */
    double Passo; /* Passo adimensional */
    double NumColisoes; /* Registo do número de eventos de dispersão */
    int Dead; /* 0/1 se o fóton estiver a propagar-se/terminado */
    int Camada; /* camada onde se encontra o pacote de fótons */
} FotaoStruct;
```

Para uma variável aleatória χ (e.g. passo, ou ângulo de deflexão), há a função densidade de probabilidade definida $p(\chi)$ que define a distribuição de χ no intervalo $[a;b]$. Para simular a propagação, é necessário obter um valor para χ de forma iterativa baseado num gerador de números pseudo-aleatórios próprio do computador. O computador gera um número pseudo-aleatório, ξ , que tem distribuição uniforme no intervalo $[0;1]$. A função densidade de probabilidade $p(\chi)$, que na maior parte dos casos não é uniforme, pode assim ser amostrado pela resolução da equação 6.1:

$$\int_a^{\chi} p(\chi) d\chi = \xi \quad \text{para } \xi \in [0;1] \quad (6.1)$$

A figura 6.4 apresenta o fluxograma da propagação de fótons num tecido composto por várias camadas adoptado pelo método MCML.

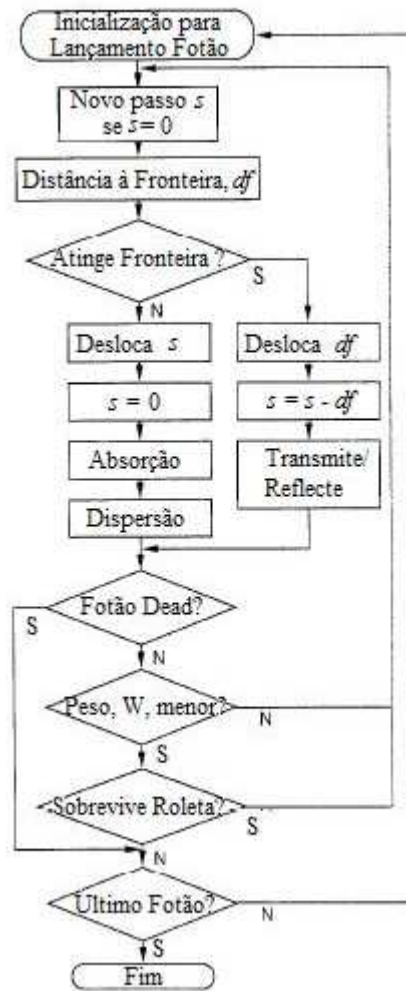


Figura 6.4 – Fluxograma para a propagação de fótons em tecidos compostos por várias camadas implementado pelo método MCML.

6.3.1 Lançamento de um pacote de fótons

Segundo o método MCML, o pacote de fótons incide ortogonalmente sobre a superfície XZ correspondendo assim a um feixe de fótons colimado e de largura infinitesimal. A posição (x, y, z) é inicializada sobre o centro da superfície XZ , $(0, 0, 0)$, e os co-senos directores (x_2, y_2, z_2) a $(0, 1, 0)$. O peso W é inicializado como sendo igual à unidade e os outros parâmetros como o *Passo*, *NumColisoes*, *Camada* e *Dead* são inicializados a zero.

Havendo uma diferença entre os índices de refração do meio ambiente (n_1) e o tecido na qual se pretende lançar o pacote de fótons (n_2) , ocorrerá o fenómeno da reflexão especular (R_{esp}) dado pela equação (5.1)

O peso do pacote de fótons, inicializado a um, é actualizado subtraindo o valor da reflexão especular de modo a obter o peso do pacote de fótons que efectivamente propagar-se-á no tecido

$$W \leftarrow W - R_{sp}, \quad (6.2)$$

onde a seta indica a actualização de parâmetros; as variáveis do lado direito têm os valores antigos e as variáveis do lado esquerdo têm os valores novos.

6.3.2 Passo

O passo (para simplificar as notações passar-se-á a designar a variável *Passo* de s) do pacote de fotões é calculado com base numa amostragem da distribuição de probabilidade do livre percurso, s ($0 \leq s \leq \infty$) que é o passo. De acordo com o coeficiente de interacção μ_t a probabilidade de interacção fóton-tecido por unidade de passo no intervalo $(s', s'+ds')$ é

$$\mu_t = \frac{-dP\{s \geq s'\}}{P\{s \geq s'\}ds'} \quad (6.3)$$

ou

$$d(\ln(P\{s \geq s'\})) = -\mu_t ds' \quad (6.4)$$

onde $P\{\}$ representa a probabilidade de se verificar a condição dentro de $\{\}$. A equação (6.4) pode ser integrada em s' no intervalo $[0, s_1]$ e dar lugar a uma distribuição exponencial, onde se utiliza $P\{s \geq 0\} = 1$,

$$P\{s \geq s_1\} = \exp(-\mu_t s_1) \quad (6.5)$$

A equação (6.5) pode ser rearranjada de forma a dar a função de distribuição cumulativa do livre percurso, s ,

$$P\{s < s_1\} = 1 - \exp(-\mu_t s_1) \quad (6.6)$$

A função densidade de probabilidade do livre percurso s é expressa por:

$$p(s_1) = \frac{dP\{s < s_1\}}{ds_1} = \mu_t \exp(-\mu_t s_1) \quad (6.7)$$

$p(s_1)$ pode ser substituído na equação (6.1) de forma a se obter:

$$s_1 = \frac{-\ln(1-\xi)}{\mu_t} \quad (6.8)$$

Ou, substituindo $(1-\xi)$ por ξ devido à simetria de ξ em torno de 0,5,

$$s_1 = \frac{-\ln(\xi)}{\mu_t} \quad (6.9)$$

No caso de existir mais do que uma camada vem,

$$\sum_i \mu_{ti} s_i = -\ln(\xi) \quad (6.10)$$

Assim, neste método MCML, o passo adimensional s , será inicializado a $-\ln(\xi)$, e apenas após o fóton ter percorrido $-\ln(\xi)$ em unidade adimensional é que terá lugar a interacção fóton-tecido.

6.3.3 Deslocamento do Fóton

Uma vez determinado um passo s_i , a posição do fóton no tecido é actualizado segundo:

$$\begin{aligned} x &\leftarrow x + x_2 \left(\frac{s_i}{\mu_t} \right) \\ y &\leftarrow y + y_2 \left(\frac{s_i}{\mu_t} \right) \\ z &\leftarrow z + z_2 \left(\frac{s_i}{\mu_t} \right) \end{aligned} \quad (6.11)$$

6.3.4 Absorção

Após o deslocamento do fóton, chega-se a um ponto de interacção fóton-tecido onde é necessário calcular a fracção do peso do pacote de fótons, ΔW , que será absorvida pelo tecido,

$$\Delta W = \left(\frac{\mu_a}{\mu_t} \right) W, \quad (6.12)$$

e de seguida é actualizado o peso do pacote de fótons

$$W \leftarrow W - \Delta W. \quad (6.13)$$

6.3.5 Dispersão

Tendo chegado a um ponto de interacção fóton-tecido e após ter sobrevivido à absorção, segue-se o fenómeno de dispersão. É necessário gerar um ângulo polar, θ ($0 \leq \theta < \pi$), e um ângulo azimutal, ψ ($0 < \psi < 2\pi$). A distribuição de probabilidade do co-seno do ângulo polar, $\cos \theta$, é descrita pela função de dispersão (4.8) proposta por Henyey e Greenstein.

Aplicando a equação (6.1), o valor de $\cos \theta$ pode ser obtido em função do número aleatório ξ :

$$\cos \theta = \begin{cases} \frac{1}{2g} \left(1 + g^2 - \left[\frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\xi} \right]^2 \right), & \text{se } g \neq 0 \\ 2\xi - 1, & \text{se } g = 0 \end{cases} \quad (6.14)$$

Como o ângulo azimutal, ψ , tem distribuição uniforme no intervalo $[0, 2\pi]$, este pode ser simplesmente gerado por

$$\psi = 2\pi\xi. \quad (6.15)$$

Uma vez obtidos os ângulos polar e azimutal, pode-se calcular a nova direcção de propagação do pacote de fótons através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} x_2 &\leftarrow \frac{\sin \theta (x_2 y_2 \cos \psi - z_2 \sin \psi)}{\sqrt{1 - (y_2)^2}} + x_2 \cos \theta \\ z_2 &\leftarrow \frac{\sin \theta (z_2 y_2 \cos \psi + x_2 \sin \psi)}{\sqrt{1 - (y_2)^2}} + z_2 \cos \theta \\ y_2 &\leftarrow -\sin \theta \cos \psi \sqrt{1 - (y_2)^2} + y_2 \cos \theta \end{aligned} \quad (6.16)$$

Caso a direcção de propagação seja suficientemente próxima ao eixo Y ($|y_2| > 0.99999$), dever-se-á aplicar as seguintes expressões por forma a evitar indeterminações como a divisão por zero:

$$\begin{aligned} x_2 &\leftarrow \sin \theta \cos \psi \\ z_2 &\leftarrow \sin \theta \sin \psi \\ y_2 &\leftarrow \text{SIGN}(y_2) \cos \theta \end{aligned} \quad (6.17)$$

onde $\text{SIGN}(y_2)$ devolve 1 no caso de y_2 ser positivo, e -1 no caso de y_2 ser negativo.

6.3.6 Fronteira

Aquando de um deslocamento de passo adimensional s , o pacote de fotões poderá atingir a fronteira da camada actual, onde esta fronteira poderá ser uma interface do tecido e o meio ambiente ou uma interface entre a actual e uma outra camada de tecido. Independentemente, o pacote de fotões pode ser ou internamente reflectido pela fronteira ou transmitir-se-á através da mesma. Caso o pacote de fotões seja internamente reflectido ou se transmite para uma outra camada de tecido, a propagação do pacote de fotões continuará. Se o pacote de fotões se transmite através de uma fronteira para o meio ambiente será registado como reflexão ou transmissão dependendo de que interface tecido/meio-ambiente ele se escapou.

Para equacionar estas hipóteses são necessários algumas etapas.

Etapa 1: Calcular a distância, d_f , da actual posição (x, y, z) do pacote de fotões até à fronteira da actual camada na direcção de propagação

$$d_f = \begin{cases} \frac{(y_0 - y)}{y_2} & \text{se } y_2 < 0 \\ \infty & \text{se } y_2 = 0 \\ \frac{(y_1 - y)}{y_2} & \text{se } y_2 > 0 \end{cases} \quad (6.18)$$

onde y_0 e y_1 são as coordenadas Y das fronteiras superiores e inferiores da actual camada (ver Figura 6.2).

Etapa 2: Verificar se o passo adimensional s , é superior à distância à fronteira d_f :

$$d_f \mu_t \leq s \quad (6.19)$$

onde μ_t é o coeficiente de interacção total da actual camada. Caso a condição (6.19) não se verifique, o passo caberá na actual camada e o pacote de fotões é deslocado segundo a equação (6.11) para chegar a um novo ponto de interacção fotão-tecido onde terão lugar os fenómenos de absorção e dispersão. Depois será gerado um novo passo adimensional por $-\ln(\xi)$ e volta-se à Etapa 1.

Caso a condição 6.21 se verifique, o pacote de fotões atingirá será deslocado até à fronteira onde embaterá e o passo s será actualizado de acordo com $s \leftarrow s - d_f \mu_t$.

Etapa 3: Se o pacote de fótons colidir com uma fronteira, é necessário calcular a probabilidade de haver reflexão interna. A reflexão interna depende do ângulo de incidência sobre a fronteira, θ_i , onde $\theta_i = 0$ representa uma incidência ortogonal. O valor de θ_i é dado por

$$\theta_i = \cos^{-1}(|y_2|). \quad (6.20)$$

A lei de Snell indica a relação entre o ângulo de incidência, θ_i , o ângulo de transmissão, θ_t , e os índices de refração dos meios do qual o fóton incide, n_i , e para o qual se transmite, n_t , segundo a equação (4.7).

Se θ_i for maior que o ângulo crítico (unicamente possível quando $n_i > n_t$), $\alpha_{crit} = \sin^{-1}(\frac{n_t}{n_i})$, a reflexão interna, $R(\theta_i)$, é colocada a um, $R(\theta_i)=1$. Caso contrário, $R(\theta_i)$, é calculado segundo a expressão de Fresnel,

$$R(\theta_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right), \quad (6.21)$$

que é uma média das reflectâncias das duas direcções de polarização ortogonal, porque se assume que a luz neste método não possui nenhuma polarização particular.

Etapa 4: Verifica-se se o fóton é transmitido ou internamente reflectido gerando um número aleatório, ξ , e compará-lo com a reflexão interna, $R(\theta_i)$, i.e.:

- Se $\xi \leq R(\theta_i)$, o fóton é internamente reflectido, mantendo-se a posição do fóton sobre a fronteira e actualizando-se os seus co-senos directores (x_2, y_2, z_2) através da inversão da componente em Y :

$$(x_2, y_2, z_2) \leftarrow (x_2, -y_2, z_2). \quad (6.22)$$

Depois volta-se à Etapa 1.

- Se $\xi > R(\theta_i)$, o fóton é transmitido através da fronteira. Se o fóton se transmite para uma outra camada de tecido terá que continuar a sua propagação com uma actualização da direcção de propagação:

$$\begin{aligned} x_2 &\leftarrow \frac{x_2 \sin \theta_t}{\sin \theta_i} \\ z_2 &\leftarrow \frac{z_2 \sin \theta_t}{\sin \theta_i} \\ y_2 &\leftarrow \text{SIGN}(y_2) \cos \theta_t \end{aligned}, \quad (6.23)$$

ou aplicando a lei de Snell (Eq. 4.7) obtém-se:

$$\begin{aligned}x_2 &\leftarrow x_2 \frac{n_i}{n_t} \\z_2 &\leftarrow z_2 \frac{n_i}{n_t} \\y_2 &\leftarrow \text{SIGN}(y_2) \cos \theta_i\end{aligned}, \tag{6.24}$$

Depois volta-se à Etapa1.

Se o fóton se transmite para o meio ambiente o peso do fóton, W , é registado como reflexão ou transmissão de acordo com o meio ambiente para o qual se transmitiu.

6.3.7 Eliminação do Pacote de Fótons

Após o lançamento de um pacote de fótons este pode ser naturalmente terminado por reflexão ou transmissão para o meio ambiente. Caso o peso de um pacote de fótons, W , que ainda se esteja a propagar dentro do tecido tenha sido progressivamente diminuído após as várias interações fóton-tecido ao ponto de cair abaixo de um valor de referência, este é automaticamente eliminado ($Dead=1$) e passa-se ao lançamento do próximo fóton.

6.4 Teste do código que implementa método MCML

Primeiro, elaborou-se, de raiz, uma versão nova do programa MCML para comparar os resultados quantitativos de reflexão e transmissão, com os existentes na literatura^{[35][36]}. Nas três simulações realizadas foi sempre considerado um tecido constituído por uma só camada caracterizada pelos parâmetros de espessura, anisotropia, índice de refração e coeficientes de absorção e dispersão. Estes parâmetros foram todos especificados pelos respectivos autores.

Condições de simulação A^[36]:

- Espessura, $d = 0,02 \text{ cm}$
- Índice de refração relativo, $n = 1$
- Coeficiente de absorção, $\mu_a = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Coeficiente de dispersão, $\mu_s = 90 \text{ cm}^{-1}$
- Factor de anisotropia, $g = 0,75$
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- Dez simulações de 50.000 pacotes de fótons cada

Condições de simulação B^[36]:

- Espessura, $d = 0,02 \text{ cm}$
- Índice de refração relativo, $n = 1,5$
- Coeficiente de absorção, $\mu_a = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Coeficiente de dispersão, $\mu_s = 90 \text{ cm}^{-1}$
- Factor de anisotropia, $g = 0$ (dispersão isotrópica)
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- Dez simulações de 5.000 pacotes de fótons cada

Condições de simulação C^[35]:

- Espessura, $d = 1 \text{ cm}$
- Índice de refração relativo, $n = 1,33$
- Coeficiente de absorção, $\mu_a = 0,1 \text{ cm}^{-1}$
- Coeficiente de dispersão, $\mu_s = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Factor de anisotropia, $g = 0,93$
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- Uma simulação de 1.000.000 de pacotes de fótons

6.5 Aplicação do método MCML ao fundo ocular

Tendo verificado a validade e correcto funcionamento do novo programa MCML construído, elaborou-se um segundo programa, agora aplicado às três camadas do fundo ocular, MLI, CN e EPR, com as respectivas características de espessura, anisotropia, índice de refração e coeficientes de absorção e dispersão descritas na literatura^[20]. Os coeficientes de absorção e de dispersão foram amostrados para um comprimento de onda de 700nm.

Considerou-se uma superfície de fundo ocular de 1000x1000 μm (XZ) composta por três camadas com as características representadas na Tabela 6.1.

	Espessura d (μm)	Índice de Refracção n	Factor de Anisotropia g	Coefficiente de Absorção μ_a (μm^{-1})	Coefficiente de Dispersão μ_s (μm^{-1})	Coefficiente de Interacção Total, μ_t (μm^{-1})
Camada 1 (MLI)	2	1,35	0,97	0,0001	0,025	0,0251
Camada 2 (CN)	200	1,35	0,97	0,0001	0,025	0,0251
Camada 3 (EPR)	12	1,40	0,84	0,07	0,146	0,216

Tabela 6.1 – Parâmetros encontrados para a respectiva camada (fonte [20]).

Outros parâmetros necessários à realização desta simulação são:

- Índice de refração do meio anterior ao fundo ocular (humor vítreo), $n = 1,336$
- Índice de refração do meio posterior ao fundo ocular (coróide), $n = 1,4$
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- 100.000.000 Pacotes de fótons

6.5.1.1 Estudo do padrão de dispersão sem drusa

Para uma análise do padrão de dispersão dos fótons, registaram-se as posições de entrada dos pacotes de fótons no fundo ocular (MLI+CN+EPR), e as posições de saída do mesmo, diferenciando a reflexão da transmissão.

6.5.1.2 Estudo da reflectância, transmitância, e absorção sem drusa

Para uma análise quantitativa da reflectância, absorção e transmitância, registaram-se ainda os valores absolutos dos fótons reflectidos, transmitidos, absorvidos e os perdidos para além das dimensões finitas do fundo ocular, bem como as respectivas acumulações em termos de peso, W .

6.5.1.3 Estudo da influência de uma drusa no padrão de dispersão

Nesta segunda etapa foi introduzida uma drusa de dimensões 200x100x100 (XYZ) para estudar a sua influência no padrão de dispersão da reflexão.

No estudo da influência da posição da drusa no padrão de dispersão dos fótons reflectidos, em vez de se aplicar apenas um ponto de incidência central de fótons, optou-se por aplicar uma grelha 3x3 em torno

da posição central com 9 posições diferentes de incidência de fótons. Cada uma destas 9 posições foi “bombardeada” por fótons até se atingir 500.000 fótons reflectidos para a respectiva posição (Figura 6.3).

Variou-se simultaneamente a posição da drusa e o seu valor de anisotropia; consideraram-se cinco posições diferentes para a drusa (Figura 6.5), variando para cada uma delas o valor da anisotropia, $g \in \{-1; -0,5; 0; 0,5; 1\}$.

Para servir de referência de comparação foi realizado uma primeira simulação sem a presença da drusa.

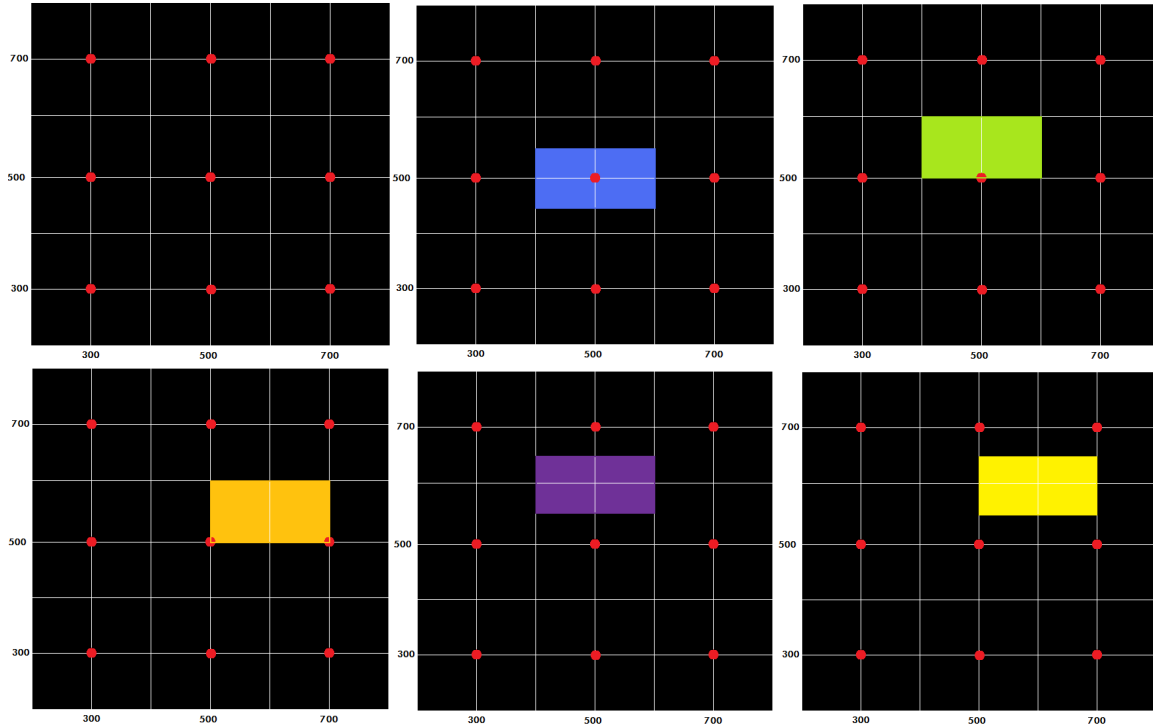


Figura 6.5 – Representação da grelha 3x3 com os 9 pontos de incidência de fótons (pontos vermelhos) sobre a superfície XZ, e as diferentes posições ocupadas pela drusa de dimensões 200x100 (XZ).

6.5.1.4 Estudo da influência de uma drusa na reflectância

Para estudar o efeito da drusa na reflectância não se considerou a referida grelha de incidência 3x3; a superfície do tecido foi apenas “bombardeada” com fótons na posição central (500,500). Desta forma evita-se um efeito de “diluição” dos resultados da reflectância associada à posição da drusa, pelas restantes 8 posições de incidência que na sua grande maioria não interagem com a drusa. As posições da drusa são aquelas representadas na Figura 6.3.

6.6 Aplicação do modelo de matriz com alguns conceitos MCML

Com o objectivo de verificar a validade da abordagem inicial deste trabalho, a matriz de pontos deflectores, e todas as características subsequentes que acarreta, tentou-se fazer a ponte entre as duas abordagens referidas, aplicando alguns conceitos MCML ao modelo inicial.

A primeira grande alteração ao método original da matriz de pontos foi o abandono da grandeza de energia, E , em prol do peso do pacote de fótons, W , que funciona de forma análoga. Com este novo parâmetro do peso de fótons foi possível introduzir também o fenómeno de absorção, segundo o Capítulo 6.3.4, em que são necessários os parâmetros de coeficiente de absorção, μ_a , e coeficiente de interacção total, μ_t , também eles estreantes no método inicial.

Directamente associado à energia na abordagem inicial, estavam as variáveis do ângulo da direcção de propagação, θ , e os consequentes vectores de direcção de propagação, x_2 e y_2 . O ângulo da direcção de propagação deixou de ser bidimensional para passar a ser tridimensional de forma a permitir uma propagação do fóton em qualquer direcção do espaço. Para satisfazer este objectivo foram adoptadas as coordenadas esféricas descritas, no Capítulo 6.3.5. Essencial ao cálculo do ângulo polar segundo esta nova abordagem, é o factor de anisotropia, g , que também passou a ser aplicado ao método original da matriz de pontos.

Os elementos do método MCML que não foram aplicados ao método da matriz de pontos são aqueles que envolvem o índice de refração, n , como a reflexão especular à entrada da primeira camada (Capítulo 6.3.1) e a possibilidade de reflexão/transmissão aquando da passagem de uma camada para outra (Capítulo 6.3.6).

Outro factor a merecer destaque é o passo que não foi actualizado, mantendo-se na sua forma inicial.

Resultados

Apresentação e Discussão

- 7.1: Tradução para linguagem C
- 7.4: Teste do código que implementa o método MCML
- 7.5: Aplicação do método MCML ao fundo ocular
- 7.6: Aplicação do modelo de matriz com alguns conceitos MCML

Capítulo 7 Resultados: Apresentação e Discussão

Para facilitar a consulta e manter a coerência, a numeração dos subcapítulos nesta secção está de acordo com a respectiva numeração dos subcapítulos do capítulo 6, Metodologia.

7.1 Tradução para linguagem C

Para verificar se o programa em Matlab original estava correctamente traduzido para a linguagem C, foram efectuados as mesmas simulações que aquelas feitas por Vasconcelos^[5].

- 9 Simulações variando o número de fótons à entrada (40.000, 50.000, 60.000, 70.000, 80.000, 90.000, 100.000, 500.000 e 1.000.000)

Apresentam-se nas gráficos 7.1 a 7.4 os gráficos relativos à dispersão de reflexão apenas para os dois extremos de número de fótons simulados, i.e. 40.000 e 1.000.000, porque são suficientes para inferir as conclusões.

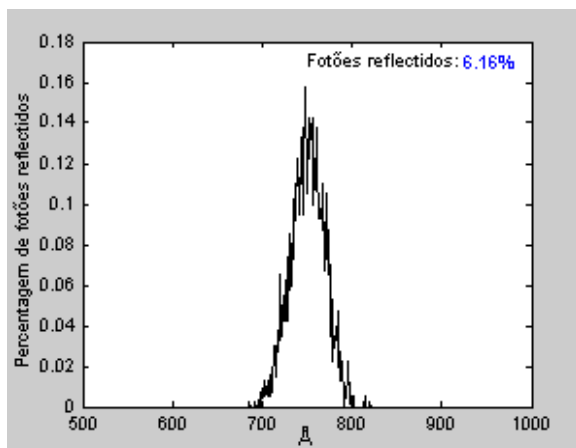


Gráfico 7.1 – Dispersão da reflexão para 40.000 fótons^[5].

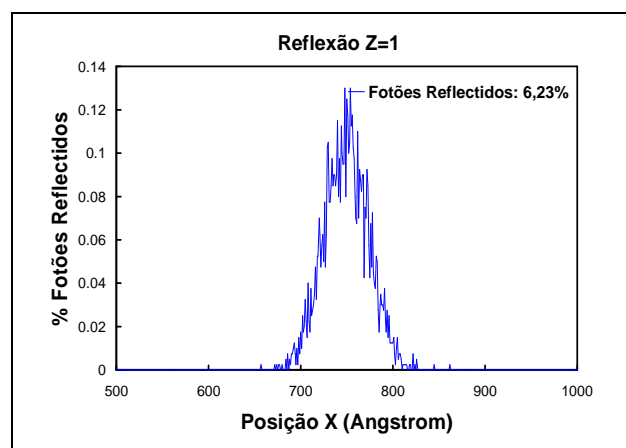


Gráfico 7.2 – Dispersão da reflexão para 40.000 fótons do presente trabalho.

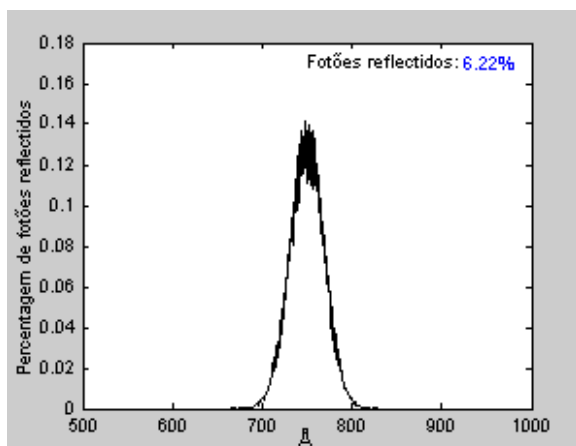


Gráfico 7.3 – Dispersão da reflexão para 1.000.000 de fótons^[5].

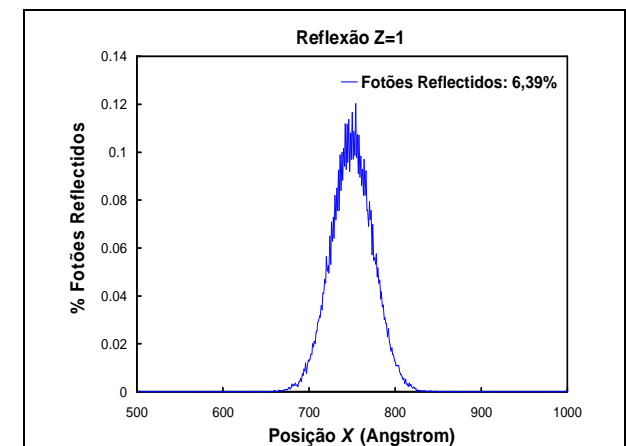


Gráfico 7.4 – Dispersão da reflexão para 1.000.000 de fótons do presente trabalho.

Existe uma melhoria progressiva do ruído estatístico conforme o aumento do número de fótons lançados.

Os gráficos obtidos pelo presente trabalho (7.2 e 7.4) apresentam uma amplitude de dispersão lateral ligeiramente maior devido ao ponto b) do Capítulo 6.1. Esta amplitude lateral afecta directamente os máximos dos gráficos 7.2 e 7.4 que se revelam ligeiramente abaixo dos dos gráficos 7.1 e 7.3, e é uma característica que se mantém para as restantes simulações deste capítulo 7.1, à excepção dos gráficos 7.10 e 7.12, uma vez que nestas simulações toda a camada CN fora substituída por átomos de cálcio e estanho respectivamente, não havendo assim a possibilidade de propagação no vazio nesta camada.

As percentagens de fótons reflectidos totais mostram estar em concordância, embora os gráficos 7.2 e 7.4, e todos os outros obtidos pelo presente trabalho em diante, têm um valor sistematicamente um pouco superior. Vasconcelos^[5] concluiu que 70.000 fótons simulados era um número satisfatório pelo que todos as simulações posteriores foram efectuados com este valor.

- **2 Simulações variando a espessura da camada CN para metade, e para o seu quadruplo (100 Å e 800 Å)**

Nas gráficos 7.5 a 7.8 apresentam-se os resultados das dispersões dos fótons reflectidos para dois valores diferentes da espessura da camada 2, CN, nomeadamente:

- uma redução para metade, 100 Å;
- e um aumento por um factor de quatro, 800 Å.

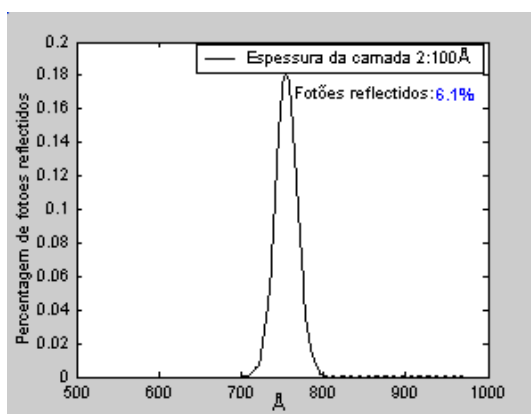


Gráfico 7.5 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 100 Å^[5].

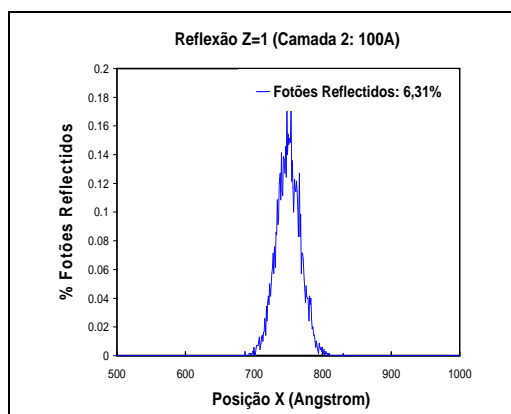


Gráfico 7.6 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 100 Å do presente trabalho.

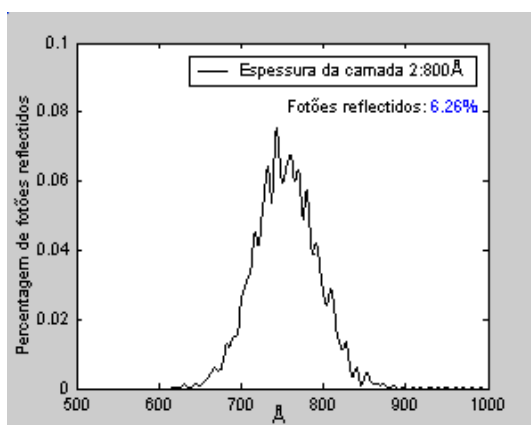


Gráfico 7.7 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 800 Å^[5].

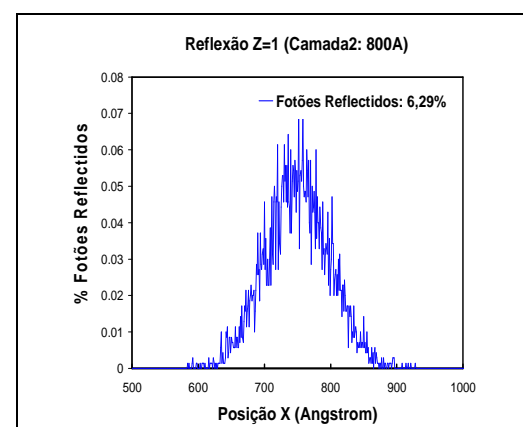


Gráfico 7.8 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 com uma espessura de 800 Å do presente trabalho.

Nestas duas simulações os gráficos originais (7.5 e 7.7) foram obtidos já com a aplicação de um filtro Butterworth para atenuar o ruído estatístico, e que deste ponto em diante foi sempre aplicado. Os gráficos obtidos com o presente trabalho (7.6 e 7.8) não têm nenhum tipo de filtro aplicado porque o *software* de programação não possui esta funcionalidade, e em virtude de uma percepção suficientemente boa dos gráficos obtidos em relação à sua importância no contexto global do projecto, achou-se desnecessário a programação de um filtro deste tipo. É por este motivo que os gráficos novos apresentam um ruído estatístico muito maior que os gráficos obtidos anteriormente.

Em relação à variação da espessura da camada 2, mostra-se que a uma espessura maior corresponde uma amplitude de dispersão maior, porque o fóton tem mais “tempo” para se dispersar. Segundo Vasconcelos^[5], as irregularidades verificadas para uma espessura de 800 Å para a camada 2 (Gráficos 7.7 e 7.8) devem-se a processos de ressonância aleatórios relacionados com a composição da camada.

- 2 Simulações substituindo toda a camada CN, primeiro por átomos de cálcio ($Z_{Ca}=20$), e depois por átomos de estanho ($Z_{Sn}=50$)

Devido ao pouco conhecimento relativo à composição das drusas, estas foram simuladas como estruturas compostas pelos átomos de cálcio ($Z_{Ca}=20$) e estanho ($Z_{Sn}=50$), ou, alternativamente, como espaços vazios.

Nas gráficos 7.9 a 7.12 estão apresentados os resultados da dispersão dos fótons refletidos no caso extremo em que toda a camada 2 é composta ou por cálcio ou por estanho.

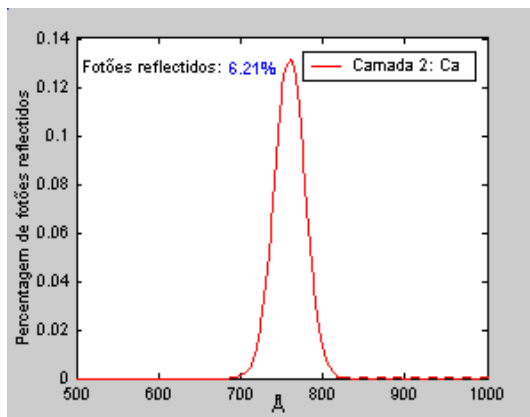


Gráfico 7.9 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por cálcio ($Z_{Ca}=20$)^[5].

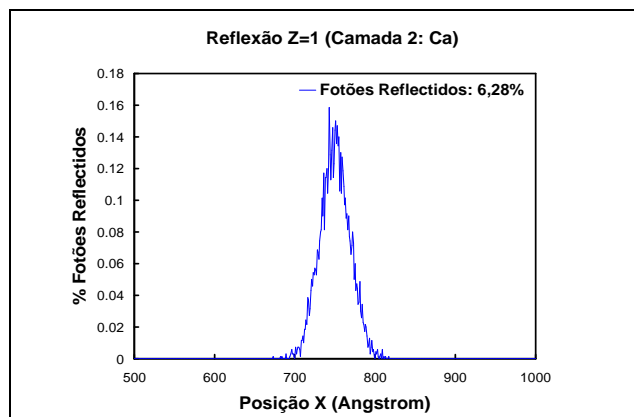


Gráfico 7.10– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por cálcio ($Z_{Ca}=20$) do presente trabalho.

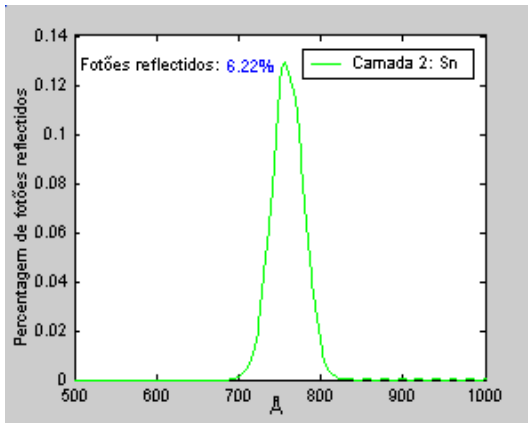


Gráfico 7.11 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por estanho ($Z_{Sn}=50$)^[5].

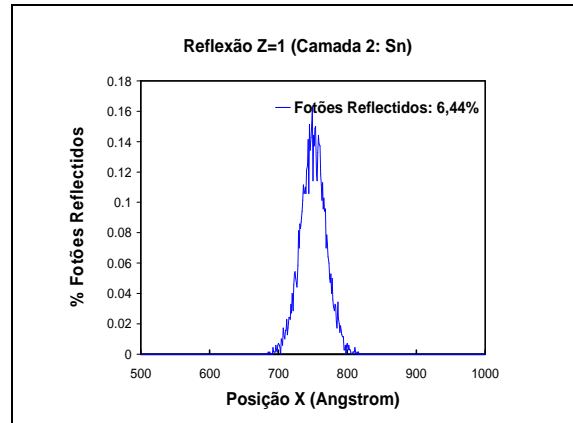


Gráfico 7.12– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com a camada 2 inteiramente constituída por estanho ($Z_{Sn}=50$) do presente trabalho.

A substituição da camada 2 por átomos ou de cálcio ou de estanho não mostrou ter qualquer efeito sobre a dispersão dos fótons reflectidos, nem da percentagem total de fótons reflectidos.

- **6 Simulações: 3 para uma drusa de cálcio com as dimensões 100x120, 12x40 e 12x20**
3 para uma drusa de estanho com as dimensões 100x120, 12x40 e 12x20

Nesta secção foram introduzidas perturbações pontuais de diferentes dimensões na camada 2, quebrando assim a sua periodicidade, para estudar o seu efeito na propagação dos fótons.

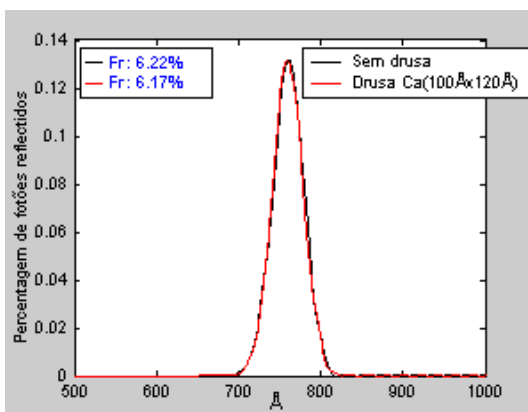


Gráfico 7.13 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 100x120 centrada^[5].

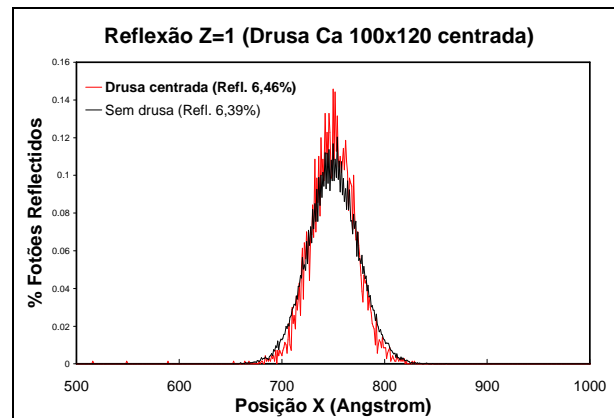


Gráfico 7.14 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 100x120 centrada do presente trabalho.

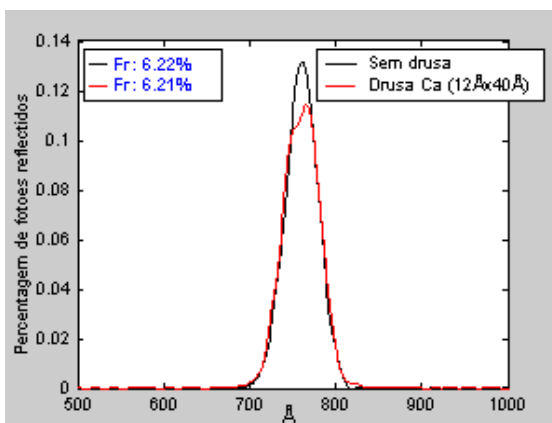


Gráfico 7.15 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 centrada^[5].

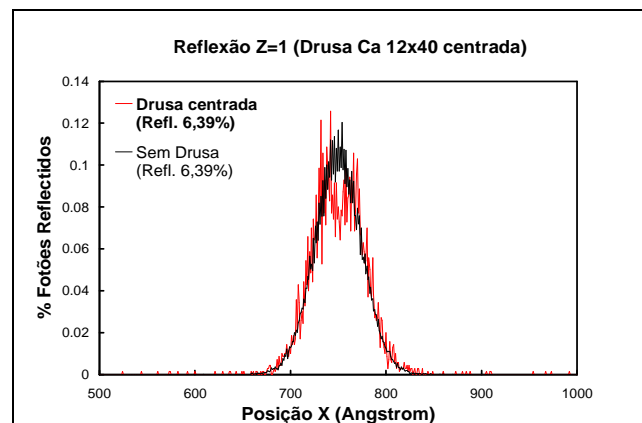


Gráfico 7.16– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 centrada do presente trabalho.

Nesta e na seguinte secção, apresentam-se só os gráficos relativos apenas a um tipo de átomo, o cálcio, porque já ficou mostrado na secção 7.1.3 que o número atómico do átomo constituinte da drusa não tem influência na dispersão nem na reflectância.

Os gráficos relativos a uma drusa de dimensões 100x120 não revelam alterações no padrão de dispersão indicando que a drusa é demasiado grande, i.e., a maior parte da difusão dá-se dentro da drusa, assemelhando-se assim ao caso do capítulo 7.1.3 em que a camada 2 é inteiramente ocupada por átomos de cálcio e estanho.

Nos gráficos 7.15 e 7.16 verifica-se uma diminuição na quantidade de fótons reflectidos no ponto central devida à maior dispersão dos mesmos originada pela presença da drusa pontual de tamanho 12x40.

A drusa de dimensões 12x20 revelou ter pouca influência na dispersão porque, por ser muito pequena, são poucos os fótons que são afectados pela sua presença (Figuras 7.17 e 7.18).

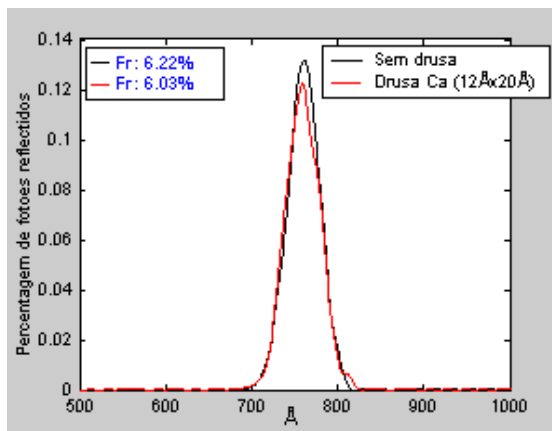


Gráfico 7.17 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x20 centrada^[5].

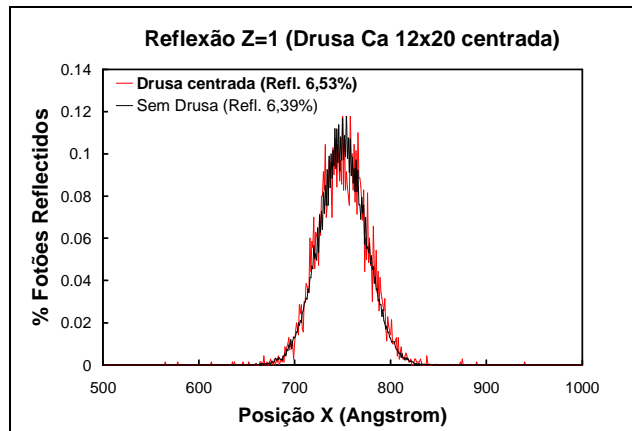


Gráfico 7.18– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x20 centrada do presente trabalho.

Conclui-se, portanto, que existe um determinado conjunto de dimensões de uma drusa pontual para o qual a sua influência no padrão de dispersão dos fótons reflectidos é mais eficaz.

- **4 Simulações: Deslocando uma drusa de cálcio 5 e 10 unidades no sentido negativo do eixo X**
Deslocando uma drusa de estanho 5 e 10 unidades no sentido negativo do eixo X

Tendo verificado o efeito do tamanho das drusas na dispersão dos fótons reflectidos, passou-se a estudar a influência da sua posição aplicando deslocamentos de 5Å e 10Å em relação à posição central. Nos gráficos 7.19 a 7.22 estão representados os resultados obtidos para estas simulações.

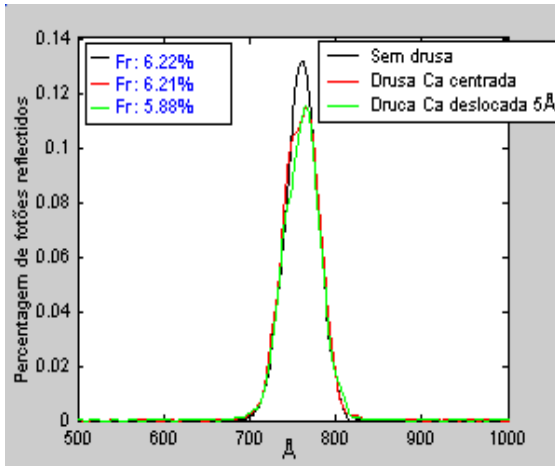


Gráfico 7.19 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -5 \AA no eixo X^[5].

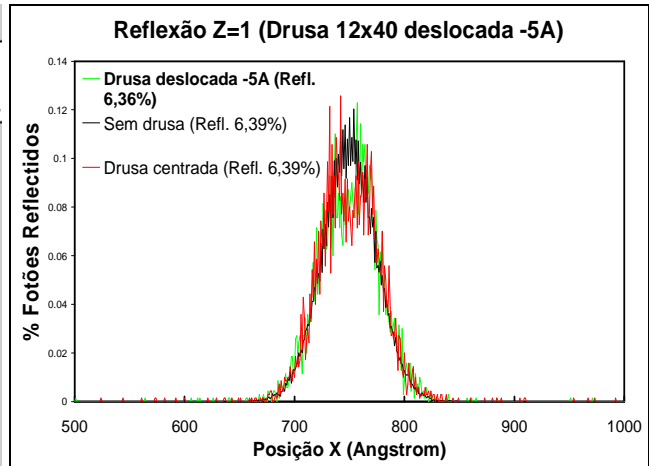


Gráfico 7.20– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -5 \AA no eixo X do presente trabalho.

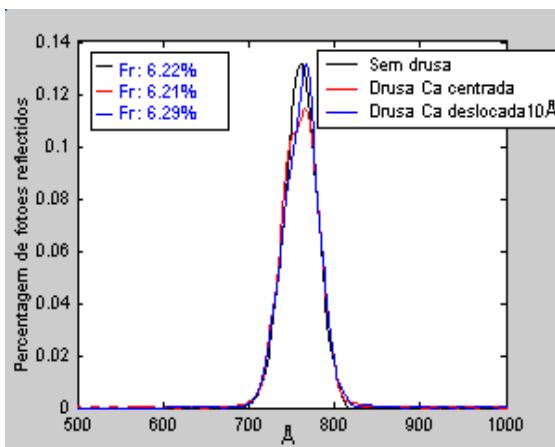


Gráfico 7.21 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -10 \AA no eixo X^[5].

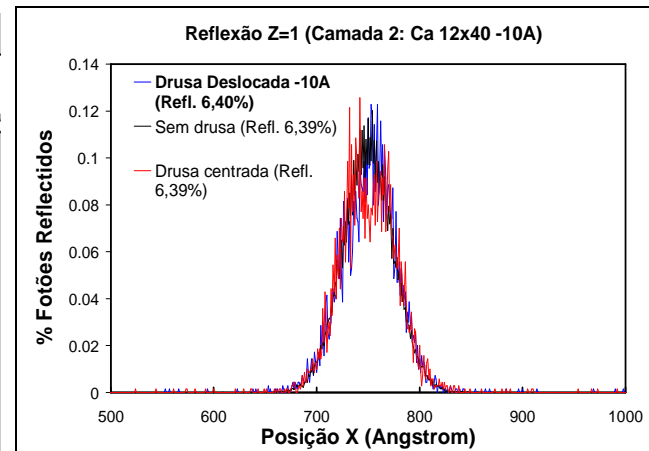


Gráfico 7.22– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa de cálcio 12x40 deslocada -10 \AA no eixo X do presente trabalho.

O ruído estatístico presente nos gráficos 7.20 e 7.22 dificulta as suas interpretações, contudo, é possível observar um ligeiro deslocamento das curvas no sentido positivo do eixo X. Este deslocamento lateral, que atinge valores de reflexão superiores em relação à drusa na posição central, deve-se ao facto de que o número de fótons que passam pela drusa é menor.

- **4 Simulações com uma drusa vazia: Centrada**

- **Deslocada 50 unidades no sentido negativo do eixo X**

- **Deslocada 75 unidades no sentido negativo do eixo X**

- **Deslocada 100 unidades no sentido negativo do eixo X**

Um dos outros extremos referidos para a desconhecida composição das drusas é o vazio, e são drusas deste tipo que foram estudadas nesta secção. Ao entrar numa zona com ausência de partículas, o fóton manterá a sua direcção de propagação até sofrer uma colisão, deixando prever que a dispersão total será tanto maior quanto maior for o tamanho da drusa vazia. Assim sendo, foi adoptado uma drusa com as dimensões 100x120 para a realização destas 4 simulações. Nos gráficos 7.23 a 7.30 apresentam-se os resultados de uma drusa, inicialmente central, que sofre uma deslocação progressiva do centro.

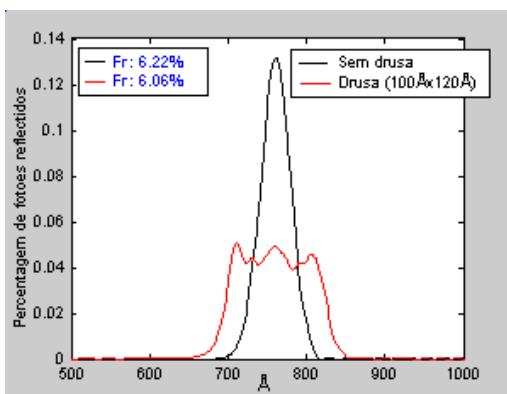


Gráfico 7.23 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 centrada [5].

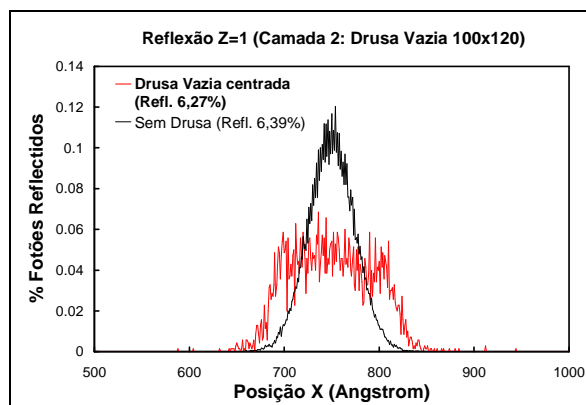


Gráfico 7.24– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 centrada do presente trabalho.

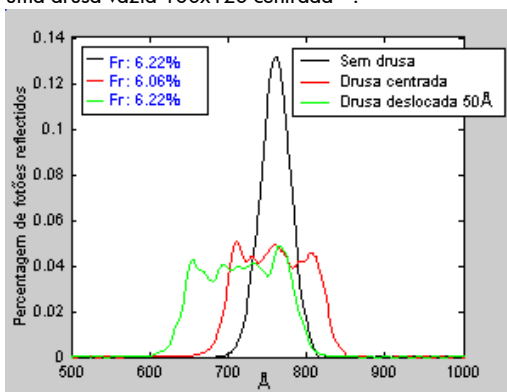


Gráfico 7.25 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -50 Å no eixo X [5].

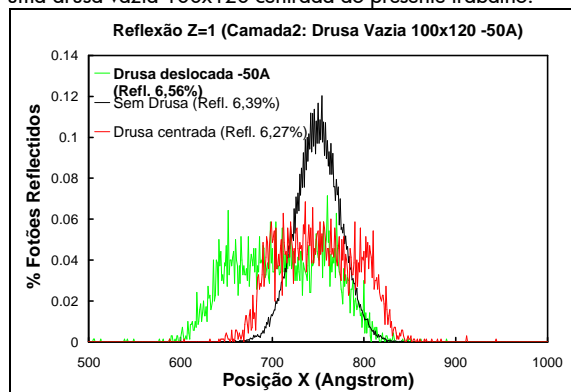


Gráfico 7.26– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -50 Å no eixo X do presente trabalho.

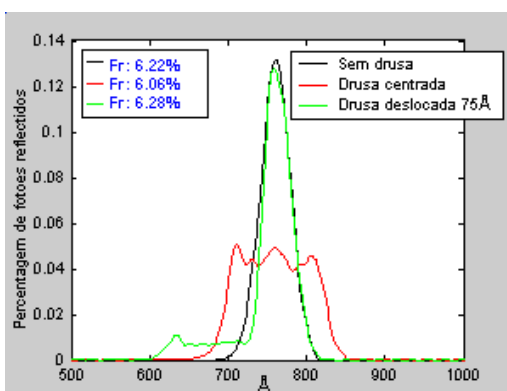


Gráfico 7.27 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -75 Å no eixo X [5].

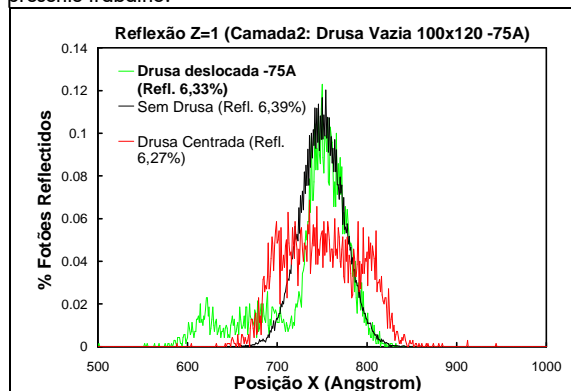


Gráfico 7.28– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -75 Å no eixo X do presente trabalho.

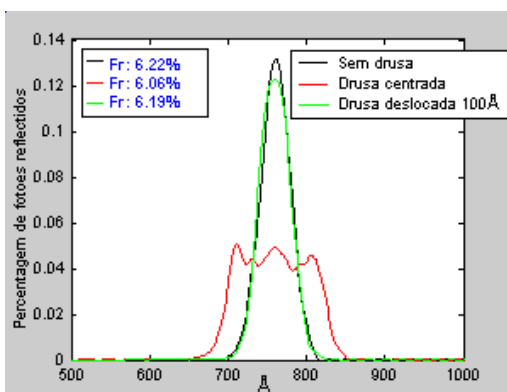


Gráfico 7.29 – Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -100 Å no eixo X [5].

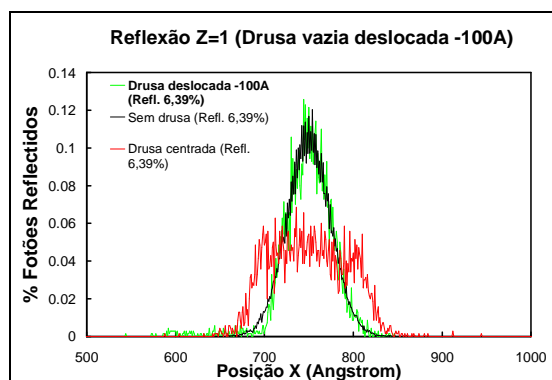


Gráfico 7.30– Dispersão da reflexão para 70.000 fótons com uma drusa vazia 100x120 deslocada -100 Å no eixo X do presente trabalho.

Nos gráficos 7.23 e 7.24 observa-se uma grande dispersão dos fótons no interior da drusa vazia uma vez que a grande maioria dos fótons interage com a drusa dadas as suas grandes dimensões.

Nos gráficos 7.25 a 7.30 observa-se a influência do deslocamento da drusa no padrão de dispersão dos fótons reflectidos conforme a proporção de fótons que são dispersados dentro da drusa vazia. Quanto maior é a deslocação da drusa, menor é a fracção de fótons que passa pelo vazio da drusa, e mais se assemelha a curva àquela obtida sem drusa.

Resumidamente, apesar das diferenças de ruído estatístico entre os gráficos de Vasconcelos^[5] e os obtidos neste trabalho, verifica-se que os resultados são concordantes na reflectância e na dispersão dos fótons reflectidos o que permite validar o novo programa em linguagem C está bem construído.

7.4 Teste do código que implementa o método MCML

Nesta fase do trabalho foi implementado um programa de simulação da propagação de fótons baseado no método MCML. Na literatura^{[35][36]} foram encontradas três simulações efectuadas com este método, as quais foram tomadas como referência para verificação do correcto funcionamento do programa elaborado.

Condições de simulação A^[36]:

- Espessura, $d = 0,02 \text{ cm}$
- Índice de refração relativo, $n = 1$
- Coeficiente de absorção, $\mu_a = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Coeficiente de dispersão, $\mu_s = 90 \text{ cm}^{-1}$
- Factor de anisotropia, $g = 0,75$
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- Dez simulações de 50.000 pacotes de fótons cada

Fonte	% Reflexão	% Transmissão
van de Hulst ^[37] , 1980	9,739	66,096
Prahl et al. ^[38] , 1989	9,711	66,159
MCML ^[36] , 1955	9,734	66,096
Presente Trabalho	9,758	66,048

Tabela 7.1 – Resultados de reflectância e transmitância para uma camada com índice de refração relativo de 1.

Analisando a Tabela 7.1 conclui-se que os resultados obtidos com o novo programa contruído estão em concordância com os obtidos por outros autores^{[36][37][38]} para a camada com as referidas características. Nesta simulação não houve reflexão especular na primeira camada uma vez que o índice de refração relativo é 1, i.e., não há diferença de índice de refração entre o meio ambiente e a camada. A predominância da transmissão em relação à reflexão deve-se em parte ao factor de anisotropia $g = 0,75$ que impõe uma dispersão maioritariamente frontal.

Condições de simulação B^[36]:

- Espessura, $d = 0,02 \text{ cm}$
- Índice de refração relativo, $n = 1,5$
- Coeficiente de absorção, $\mu_a = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Coeficiente de dispersão, $\mu_s = 90 \text{ cm}^{-1}$
- Factor de anisotropia, $g = 0$ (dispersão isotrópica)
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- Dez simulações de 5.000 pacotes de fótons cada

Fonte	% Reflexão
Giovanelli ^[39] , 1955	26,000
Prahl et al. ^[38] , 1989	25,907
MCML ^[36] , 1995	26,079
Presente Trabalho	25,201

Tabela 7.2 – Resultados de reflectância e transmitância para uma camada com índice de refração relativo de 1,5.

Da Tabela 7.2 conclui-se que o resultado conseguido pelo presente trabalho é ligeiramente inferior àqueles obtidos por outros autores^{[36][38][38]}. Esta pequena divergência de valores levantou alguma dúvida e levou à realização de um teste de estabilidade dos valores obtidos. Este teste consistiu em fazer dez simulações com diferentes números de pacotes de fótons à entrada, e comparar os resultados obtidos. Os resultados apresentam-se na Tabela 7.3

	500	5.000	50.000	500.000	5.000.000	50.000.000
i	23,731	24,783	24,886	25,116	25,141	
ii	23,876	24,909	24,996	25,138	25,149	
iii	24,684	25,027	25,044	25,156	25,154	
iv	25,607	25,071	25,063	25,158	25,155	
v	25,776	25,073	25,140	25,164	25,159	
vi	26,168	25,186	25,167	25,173	25,162	25,156
vii	26,413	25,412	25,223	25,185	25,163	
viii	26,616	25,426	25,231	25,218	25,164	
ix	26,897	25,480	25,251	25,220	25,181	
x	27,549	25,645	25,513	25,270	25,202	
Média	25,732	25,201	25,151	25,180	25,163	25,156

Tabela 7.3 – Resultados do teste de estabilidade onde foram realizados dez simulações com um número crescente de pacotes de fótons à entrada, de 500 a 50 milhões. Atenta-se que só foi realizada uma simulação com 50.000.000. Os resultados estão ordenados de forma crescente para facilitar a identificação dos mínimos e máximos, tendo sido também calculados os valores médios para cada número de pacotes de fótons à entrada.

Os resultados deste teste mostram que existe alguma variação considerável para pacotes com 500 e 5.000 fótons à entrada, embora não justifique a pequena divergência do valor conseguido pelo presente trabalho na Tabela 7.2. Conclui-se que as simulações devam ser realizadas com o maior número de pacotes de fótons à entrada possível, sugerindo um mínimo de 50.000 fótons por simulação. O facto dos

referidos autores terem realizado dez simulações de 5.000 fótons cada, provavelmente terá sido por limitações de velocidade e tempo de processamento que hoje em dia são muito menores.

Nesta simulação ocorre reflexão especular dado o índice de refração relativo de 1,5. Os referidos autores não especificaram qual a percentagem da reflexão total que se deve à reflexão especular mas o valor obtido neste trabalho foi de 4,000% que já está incluído no valor apresentado na Tabela 7.2. Obteve-se também os valores de transmissão e absorção, respectivamente, 29,302% e 45,574%, embora não seja possível compará-los porque os autores não forneceram essa informação.

Contudo, é possível fazer uma análise interna e verificar que a maior proximidade dos valores de reflexão e transmissão nesta simulação se justificam pelo factor de anisotropia nulo, $g = 0$, o que implica uma dispersão isotrópica, ou seja, a dispersão é feita sem tendência para a dispersão frontal nem para a retrodispersão.

Condições de simulação C^[36]:

- Espessura, $d = 1 \text{ cm}$
- Índice de refração relativo, $n = 1,33$
- Coeficiente de absorção, $\mu_a = 0,1 \text{ cm}^{-1}$
- Coeficiente de dispersão, $\mu_s = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Factor de anisotropia, $g = 0,93$
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- Uma simulação de 1.000.000 de pacotes de fótons

Fonte	% Reflexão	% Transmissão	% Absorção
Côté e Vitkin ^[35] , 2005	18,5	55,1	24,3
MCML ^[36] , 1995	18,8	55,2	24,0
Presente Trabalho	18,7	55,2	24,1

Tabela 7.4 – Resultados de reflectância, transmitância e absorção para uma camada com índice de refração relativo de 1,33. Nos três casos considerados existe uma reflexão especular de 2% na primeira interface devido à diferença de índice de refração entre o ar e o tecido.

Os resultados obtidos com este trabalho, apresentados na Tabela 7.4, estão mais uma vez em concordância com os obtidos por outros autores^{[35][36]} para a camada com as referidas características. Nesta simulação ocorre reflexão especular dado o índice de refração relativo de 1,33. Côté e Vitkin^[35] especificaram que a percentagem de reflexão que se deve à reflexão especular na primeira interface foi de 2%, tendo neste trabalho obtido um valor de 2,006%. Note-se que, neste caso, estes valores de reflexão especular não estão incluídos na reflexão da Tabela 7.4.

A predominância da transmissão em relação à reflexão deve-se novamente ao elevado valor de anisotropia $g = 0,93$.

Terminada esta fase que validou o programa que implementa o método MCML, passou-se ao estudo do fundo ocular composto pelas três camadas MLI, CN e EPR com os seus respectivos parâmetros.

7.5 Aplicação do modelo MCML ao fundo ocular

Para facilitar a consulta, recordam-se as características desta simulação referidas no capítulo 6.5.

Considerou-se uma superfície de fundo ocular de $1000 \times 1000 \mu\text{m}$ (XZ) composta por três camadas (MLI, CN e EPR) com as características representadas na Tabela 7.1.

	Espessura d (μm)	Índice de Refracção n	Factor de Anisotropia g	Coefficiente de Absorção μ_a (μm^{-1})	Coefficiente de Dispersão μ_s (μm^{-1})	Coefficiente de Interação Total, μ_t (μm^{-1})
Camada 1 (MLI)	2	1,35	0,97	0,0001	0,025	0,0251
Camada 2 (CN)	200	1,35	0,97	0,0001	0,025	0,0251
Camada 3 (EPR)	12	1,40	0,84	0,07	0,146	0,216

Tabela 7.5 – Parâmetros encontrados para a respectiva camada (fonte [20]).

Outros parâmetros necessários à realização desta simulação são:

- Índice de refração do meio anterior ao fundo ocular (humor vítreo), $n = 1,336$
- Índice de refração do meio posterior ao fundo ocular (coróide), $n = 1,4$
- *Threshold* para terminação do pacote de fótons, $W = 0,0001$
- 100.000.000 de pacotes de fótons incididos sobre a posição central do tecido

7.5.1.1 Estudo do padrão de dispersão sem drusa

As figuras 7.1 e 7.2 mostram a distribuição dos fótons de entrada em torno do ponto de incidência central.

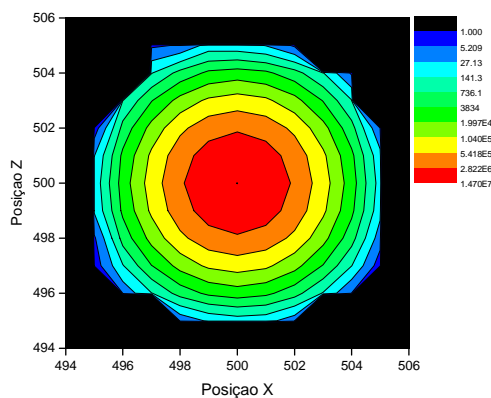


Figura 7.1 – Mapa de cores da dispersão dos 100.000.000 de fótons à entrada com uma escala logarítmica.

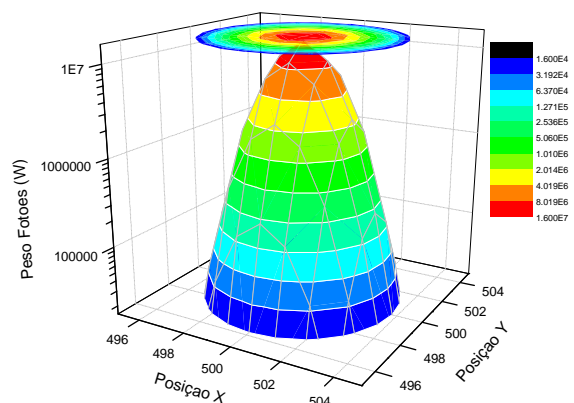


Figura 7.2 – Gráfico 3D da dispersão dos 100.000.000 de fótons à entrada com escala logarítmica.

As figuras 7.1 e 7.2 mostram que o objectivo de ter uma distribuição normal dos fótons à entrada foi conseguido.

Nas figuras 7.3 a 7.6 apresentam-se os padrões de dispersão dos fótons reflectidos e transmitidos na forma de um mapa de cores e de um gráfico 3D.

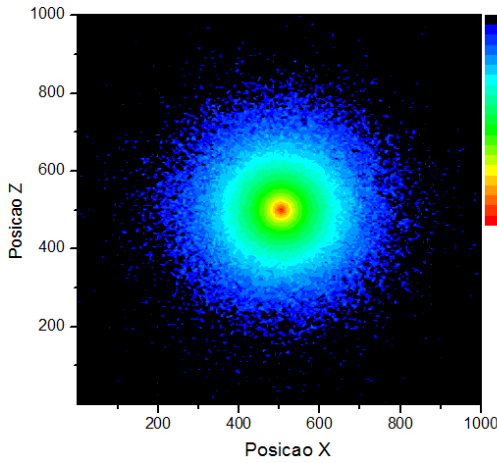


Figura 7.3 – Mapa de cores da dispersão dos fótons transmitidos com uma escala logarítmica.

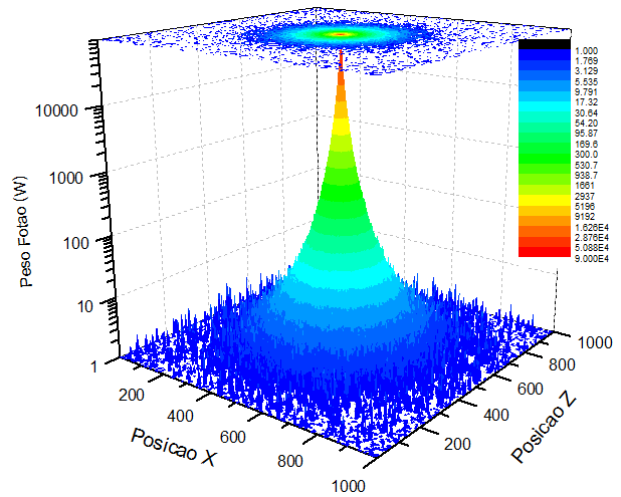


Figura 7.4 – Gráfico 3D da dispersão dos fótons transmitidos com escala logarítmica.

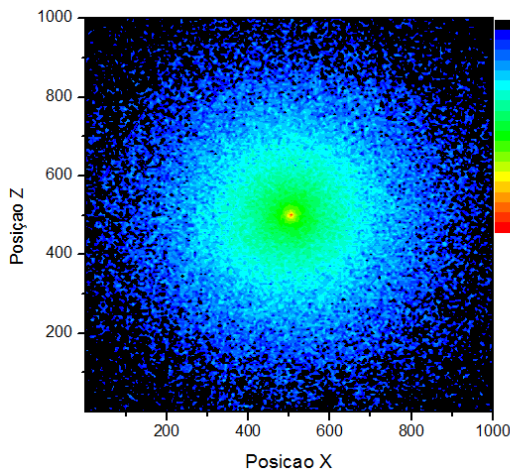


Figura 7.5 – Mapa de cores da dispersão dos fótons reflectidos com uma escala logarítmica.

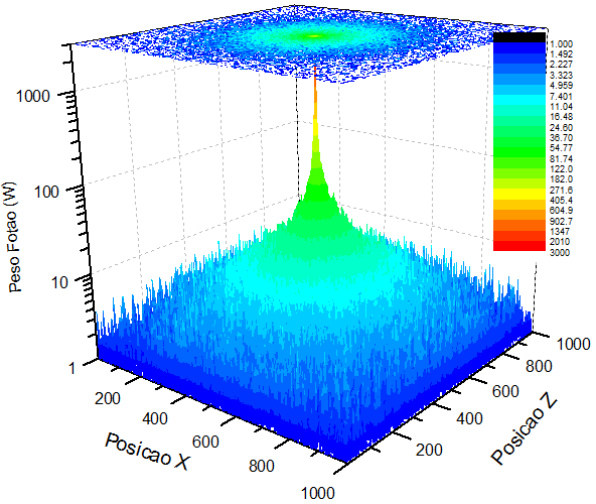


Figura 7.6 – Gráfico 3D da dispersão dos fótons reflectidos com escala logarítmica.

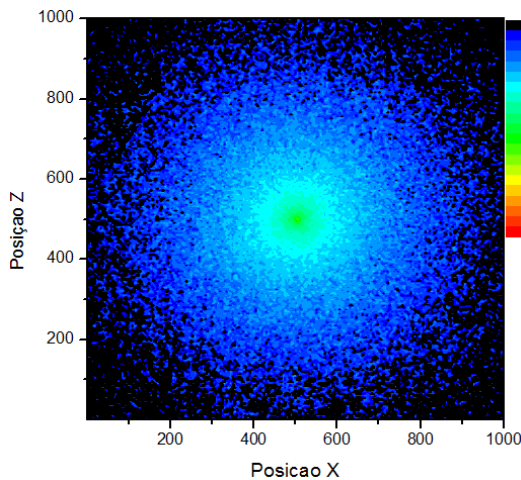


Figura 7.7 – Mapa de cores da dispersão dos fótons reflectidos com uma escala logarítmica igual à dos fótons transmitidos.

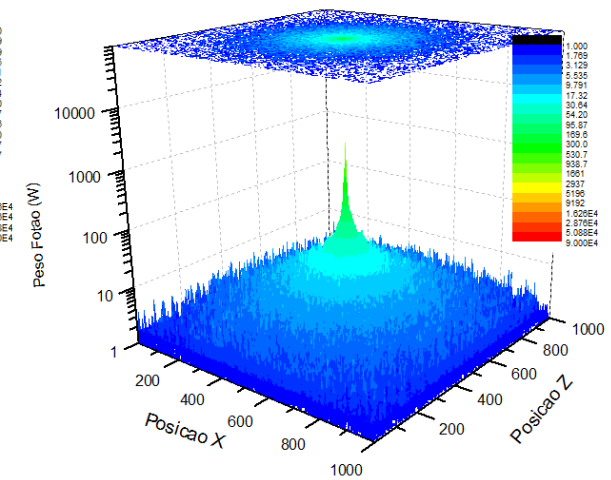


Figura 7.8 – Gráfico 3D da dispersão dos fótons reflectidos com escala logarítmica igual à dos fótons transmitidos.

Nas figuras 7.3 a 7.8 verifica-se que os fotões reflectidos são mais dispersos que os fotões transmitidos, e que em ambos os casos a dispersão é radialmente uniforme.

7.5.1.2 Estudo da reflectância, transmitância, e absorção sem drusa

Na Tabela 7.6 estão listados os resultados obtidos do presente trabalho que visava o estudo principalmente da reflectância, mas também de outras grandezas como a transmitância e a absorção.

Fenómeno	% Peso do Fotão (W)	% Peso do Fotão (W), excluindo os <i>Fora</i>	% Fotões Absolutos (N°)	% Fotões Absolutos (N°) excluindo os <i>Fora</i>
Reflexão	4,317	4,521	11,099	11,625
Transmissão	36,558	38,291	84,086	88,071
Absorção	54,600	57,188	-	-
Fracos	~0,000	~0,000	0,290	0,304
Fora	4,525	-	4,525	-
Soma	100,000	100,000	100,000	100,000

Tabela 7.6 – Resultados obtidos para uma simulação com 100.000.000 fotões de entrada. Registou-se um valor de 0,003% de reflexão especular na interface do humor vítreo para a primeira camada MLI que está incluído no valor da reflexão total.

Por *Fracos* entendam-se os fotões que foram eliminados porque o seu peso W era inferior ao limite mínimo, *Threshold*. Por *Fora* entendam-se os fotões perdidos por se terem dispersado além dos limites do tecido considerados, $1000 \times 1000 \mu\text{m}$.

Na coluna “% Peso do Fotão (W)” da Tabela 7.6, registaram-se as percentagens de cada fenómeno em relação ao efectivo peso dos fotões de entrada total, i.e., já depois de ocorrer a reflexão especular que elimina uma pequena fracção do peso dos fotões (ver Capítulo 6.3.1).

$$\% W_{\text{Fenómeno}_i} = \frac{W_{\text{Fenómeno}_i}}{W_{\text{entr.tot.}}}, \quad (7.1)$$

onde

$$W_{\text{entr.tot.}} = W_{\text{inicial total}} - W_{\text{refl.sp.tot.}} \quad (7.2)$$

Na terceira coluna, “% Fotões Absolutos”, registou-se o número de fotões absoluto que sofre cada possível desfecho (reflexão, transmissão, fora ou fraco), para ter uma ideia geral das proporções destes processos. A grande maioria dos fotões foram transmitidos, 84,086%, e 11,099% dos fotões foram reflectidos. Uma percentagem significativa de 4,525% fotões são perdidos para além dos limites do fundo ocular, facto que levou ao seguinte reparo:

como estes fotões *Fora* são perdidos por se terem dispersado além dos limites do tecido (o que não é um desfecho realístico na propagação dos fotões, mas sim o resultado de uma limitação física inerente à programação da simulação), os valores mais correctos das percentagens dos fenómenos possíveis não incluem os fotões *Fora*:

$$\% W_{\text{Fenómeno}_i} = \frac{W_{\text{Fenómeno}_i}}{W_{\text{entr.tot.}} - W_{\text{Fora}}} \quad (7.3)$$

Os valores obtidos excluindo os fótons *Fora* apresentam-se por isso ligeiramente superiores em relação aos valores com a inclusão dos mesmos para cada desfecho possível.

Os valores apresentados em relação ao peso dos fótons (W) são inferiores àqueles em relação ao número de fótons absoluto (N°) devido à perda de peso nos sucessivos processos de absorção (ver capítulo 6.3.4) que ocorrem antes de um fóton ser eliminado seja pelo desfecho que for.

Os resultados obtidos na Tabela 7.6 podem ainda ser comparados com aqueles conseguidos no capítulo 7.1 com a matriz de pontos. Visto que no processo de simulação do capítulo 7.1 não estava ainda incluído o fenómeno de absorção de uma fracção do peso dos fótons em cada interacção, os valores aí obtidos deverão ser comparados com a reflectância, em relação ao número absoluto de fótons (N°) da Tabela 7.6. No capítulo 7.1 foi obtida uma reflectância de 6,39%, enquanto com o método MCML obteve-se 11,625%. Contudo, no método do capítulo 7.1 há algumas imposições postas ao processo de reflexão, nomeadamente:

- a possibilidade de haver reflexão está limitada à terceira e última camada, o EPR, não podendo haver reflexão nas primeiras duas camadas MLI e CN;
- e a própria ocorrência de reflexão na camada EPR está definida segundo um valor retirado da literatura de 4%.

Assim, considerando a divergência dos referidos valores, conclui-se que os 11,625% do método MCML é mais fiável, por ser mais independente e livre de imposições de programação, e de acordo com a própria definição do método de Monte Carlo.

7.5.1.3 Estudo da influência de uma drusa no padrão de dispersão

Nesta etapa foi introduzida uma drusa de dimensões $200 \times 100 \times 100 \mu\text{m}$ (XYZ) para estudar a sua influência no padrão de dispersão da reflexão. Para este efeito foram aplicados 9 pontos de incidência conforme está ilustrado na figura 7.9. Em cada uma destas posições procedeu-se a lançamentos de pacotes de fótons até atingir um valor de 500.000 fótons reflectidos passando depois para a próxima posição de incidência.

Variou-se simultaneamente a posição da drusa e o seu valor de anisotropia, considerando cinco posições diferentes para a drusa, e cinco valores diferentes para a anisotropia, $g \in \{-1; -0,5; 0; 0,5; 1\}$ (Figura 7.11). Para servir de referência de comparação foi realizado uma primeira simulação sem a presença da drusa (Figura 7.10).

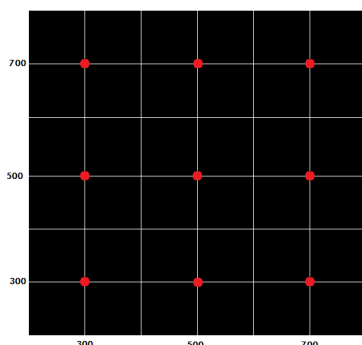


Figura 7.9 – Grelha 3x3 dos pontos de incidência dos reflectidos fótons de entrada.

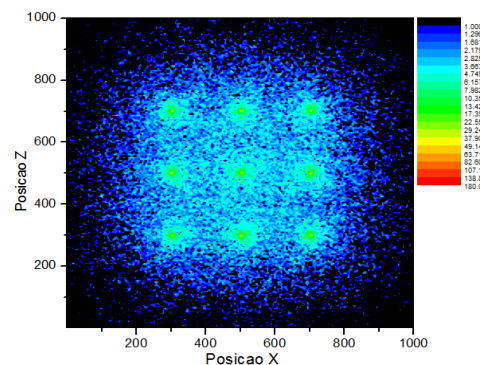


Figura 7.10– Mapa de cores da dispersão dos fótons reflectidos para a grelha de incidência sem drusa.

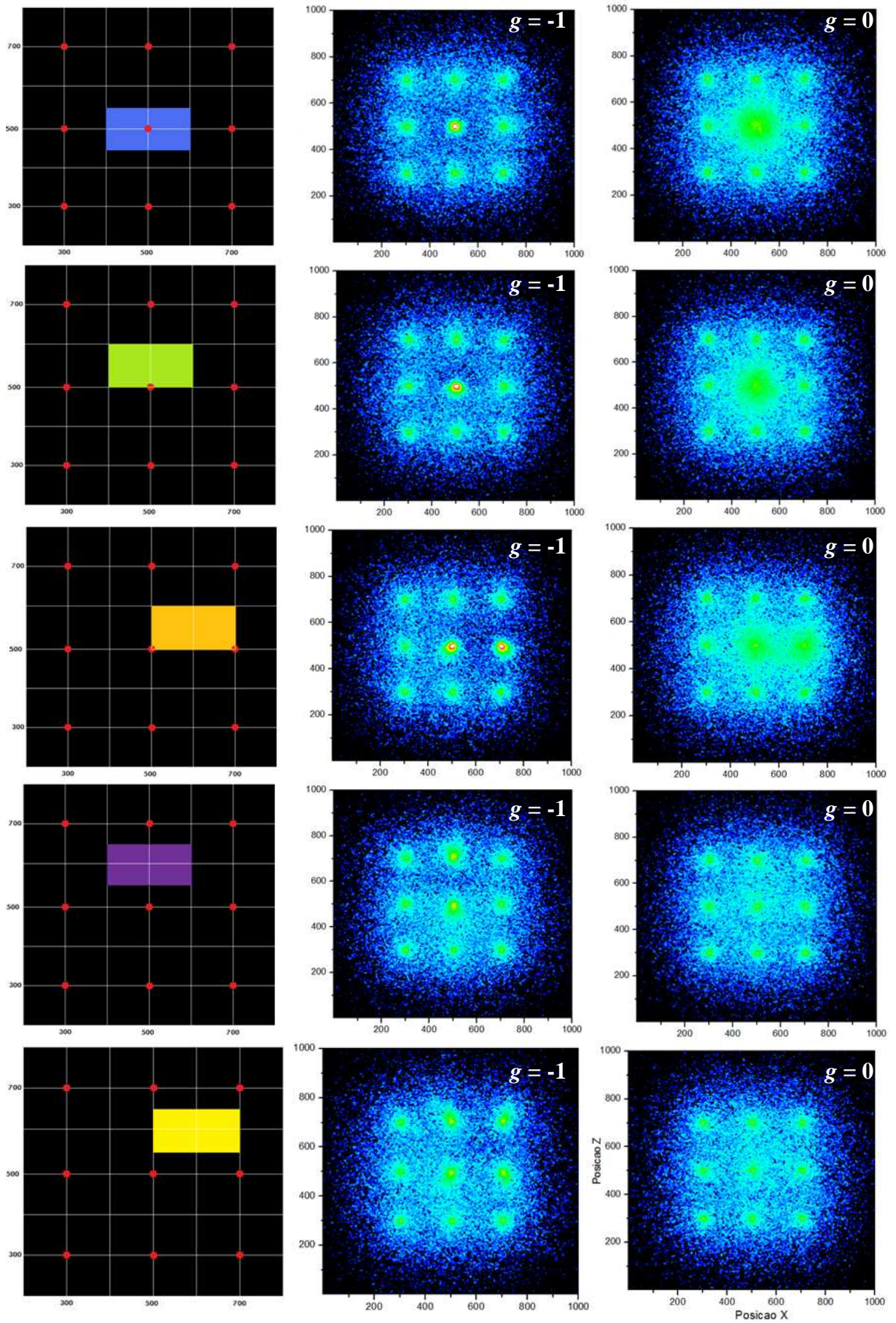


Figura 7.11 – Resultados dos padrões de dispersão dos fótons reflectidos para as diferentes posições da drusa (200x100x100), para dois valores de anisotropia $g = -1$ e $g = 0$. Cada posição de incidência foi “bombardeada com fótons até atingir 500.000 fótons reflectidos, perfazendo um total de 9x500.000 fótons reflectidos.

Na Figura 7.11 apresentam-se os padrões de dispersão dos fótons reflectidos para cinco posições diferentes da drusa, e para os valores de anisotropia de $g = -1$ e $g = 0$. Os resultados obtidos para drusas com uma anisotropia de $g = 1$ são praticamente iguais à Figura 7.10 porque o factor de anisotropia da camada em que a drusa se encontra é $g = 0,97 \approx 1$ (ver Tabela 6.1).

Verifica-se, assim, que a anisotropia da drusa influencia o padrão de dispersão dos fótons reflectidos. Para valores de $g = -1$ a drusa actua praticamente como um “espelho” para os fótons que nela incidem, havendo uma dispersão muito reduzida dentro da drusa.

Para o outro extremo, $g = 1$, a drusa é praticamente “invisível” aos fótons porque estes têm uma dispersão totalmente frontal. Os padrões de dispersão obtidos com este valor de anisotropia são assim indistinguíveis àquele da Figura 7.10 obtido sem drusa.

O valor intermédio de $g = 0$ é aquele que apresenta maior dispersão lateral uma vez que os fótons passam a ser dispersados de forma uniforme em todo o espaço, sem tendência para nenhuma direcção específica. Este aumento da dispersão lateral é mais notório para as drusas azul, verde e laranja devido ao facto de haver maior número de fótons que interagem com elas.

7.5.1.4 Estudo da influência de uma drusa na reflectância

Recorde-se que para estudar a influência de uma drusa na reflectância considerou-se apenas um ponto de incidência central.

Para estudar o efeito de uma drusa na reflectância não se considerou a referida grelha de incidência 3x3; considerou-se apenas um ponto de incidência central (500,500). Desta forma evita-se um efeito de “diluição” dos resultados da reflectância associada à posição da drusa, pelas restantes 8 posições de incidência que na sua grande maioria não interagem com a drusa. As posições da drusa são aquelas representadas na Figura 6.3.

	% Reflexão									
	$g = -1$		$g = -0,5$		$g = 0$		$g = 0,5$		$g = 1$	
	W	Nº	W	Nº	W	Nº	W	Nº	W	Nº
Sem drusa					4,521	11,625				
Drusa centrada	70,562	73,424	66,304	71,021	56,335	62,085	36,778	44,022	2,975	9,643
Drusa deslocada +50z	34,388	39,002	29,818	35,362	23,403	29,653	14,845	21,788	3,864	10,863
Drusa deslocada +100x50z	17,717	23,411	15,470	21,624	12,104	18,623	8,368	15,268	4,233	11,305
Drusa deslocada +100z	5,426	11,605	5,133	11,399	4,995	11,413	4,847	11,425	4,495	11,664
Drusa deslocada +100x100z	4,977	11,492	4,862	11,403	4,773	11,405	4,676	11,420	4,515	11,692

Tabela 7.7 – Resultados da reflectância obtidos para simulações de 1.000.000 de fótons de entrada na posição central para cada posição da drusa.

Da Tabela 7.7 tiram-se as seguintes conclusões:

- i. a reflectância em termos de números de fótons absolutos, N° , é sempre superior à respectiva reflectância em termos do peso dos fótons, W , representados a sombreado. Esta diferença deve-se à perda de peso dos fótons nos processos de absorção;
- ii. os valores de reflectância, para ambos os parâmetros W e N° , diminuem com o aumento do factor de anisotropia g para cada posição da drusa. Isto acontece porque, para $g = -1$, a drusa é totalmente retro-dispersora funcionando como “espelho”, e para $g = 1$ a dispersão é totalmente frontal sendo a drusa praticamente “invisível” aos fótons;
- iii. conforme a drusa se distancia do ponto de incidência dos fótons, e fixando um valor de g , a reflectância vai diminuindo até valores próximos daqueles verificados sem drusa, precisamente por decréscimo do número de fótons que interagem com a drusa;

7.6 Aplicação do modelo de matriz com alguns conceitos MCML

Na derradeira fase do projecto, foram introduzidos alguns processos do método MCML na abordagem inicial da matriz de pontos com o objectivo de torná-la mais próxima da realidade. Na Tabela 7.8 apresentam-se os resultados obtidos para uma incidência central com 1.000.000 de fótons.

Fenómeno	% Peso do Fóton (W)	% Peso do Fóton (W), excluindo os <i>Fora</i>	% Fótons Absolutos (N°)	% Fótons Absolutos (N°) excluindo os <i>Fora</i>
Reflexão	24,322	25,205	46,700	48,394
Transmissão	0,024	0,025	7,800	8,083
Absorção	30,15	31,247	-	-
Fracos	42,000	43,523	42,000	43,523
Fora	3,500	-	3,500	-
Soma	100,000	100,000	100,000	100,000

Tabela 7.8 – Resultados obtidos para uma simulação com 500.000 fótons de entrada.

Os resultados obtidos nesta simulação divergem excessivamente daqueles conseguidos no capítulo 7.5.1.2 indicando a existência de algumas falhas no modelo. Para além de uma quantia exagerada de fótons reflectidos absolutos, quase metade do total(!), assiste-se um valor de transmitância muitíssimo baixo de apenas 8,083%.

Crê-se que estes valores devem-se principalmente ao passo utilizado. Nesta simulação não foi incorporado o passo do método MCML descrito na secção 6.3.2, e o passo utilizado é sempre de uma unidade à escala da matriz de átomos utilizada, neste caso $1\mu\text{m}$. Este facto faz com que os fótons percorram um passo demasiado grande e haja um número excessivo de fótons reflectidos ainda na primeira camada, a MLI.

Outro factor que poderá influenciar o excesso de reflexão é a posição do centro da gaussiana dos fótons de incidência caso coincida com uma posição ocupada por um átomo ocorrendo logo uma colisão e sujeitando-se o fóton a sofrer reflexão.

Conclusões

e Perspectivas Futuras

Capítulo 8 Conclusões e Perspectivas Futuras

A elaboração de programas de simulação pelo método de Monte Carlo mostrou ser uma ferramenta poderosa no estudo da propagação da luz no fundo ocular. A possibilidade de incluir e controlar diferentes fenómenos físicos e variáveis envolvidas, de forma simultânea ou individual, confere uma grande liberdade de manipulação e precisão do sistema, características importantes para o estudo detalhado dos processos de propagação e interacção com a matéria de fótons no fundo ocular.

No processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento do método da matriz de pontos, o projecto sofreu um desvio rumo ao método MCML. Esta nova abordagem foi implementada com sucesso e depois adaptada ao objecto de estudo do presente trabalho, o fundo ocular humano. Obtiveram-se resultados interessantes e promissores com esta técnica, entre os quais, uma visualização bidimensional e tridimensional do padrão de dispersão dos fótons, e valores de reflectância, transmitância e absorção. A introdução de uma drusa na camada neuronal mostrou ter consequências visíveis na reflectância e padrão de dispersão dos fótons reflectidos, dependendo da sua posição e valor de anisotropia. Para além destas duas características, as drusas têm outras características que divergem da normalidade da retina humana, como o índice de refração, cuja influência, entre outras, será interessante de se estudar.

Em relação ao método da matriz de pontos, os resultados anormais serviram para indicar algumas imperfeições desta abordagem, constituindo, entre outros, os objectivos para o desenvolvimento futuro deste projecto. Assim, a melhoria deste modelo terá que passar pela obtenção de uma amostragem do passo de escala necessariamente inferior à escala da matriz de átomos. Só depois é que poderão ser acrescentados mais processos, como aqueles dependentes do índice de refração que ditam a reflexão ou transmissão na interface de camadas.

Uma desvantagem do método da matriz de pontos em relação ao método MCML é o seu tempo de processamento superior devido à necessidade de alocação de memória para cada posição da matriz de pontos.

Para terminar, apesar de não se ter conseguido desenvolver o modelo da matriz de pontos sugerido ao ponto que se pretendia, a implementação e estudo do fundo ocular pelo método existente MCML foi um passo importante e necessário para a consolidação dos conhecimentos envolvidos no processo de propagação de fótons, que se mostra de grande utilidade aquando do desenvolvimento do modelo proposto.

Bibliografia

- [1] Patel N, Adewoyin T, Chong N V; "Age-related macular degeneration: a perspective on genetic studies"; *EYE*, 2007
- [2] Peli E, Lahav M; "Drusen Measurement from Fundus photographs Using Computer Image Analysis"; *Acta Ophthalmology*, 93; 1575-1580; 1986
- [3] Sebag M, Peli E, et al.; "Image analysis of changes in drusen areas"; *Acta Ophthalmologica*, 69; 603-610; 1991
- [4] Boas D A, Brooks D H, Miller E L , DiMarzio C A, Kilmer M, Gaudette R J, Zhang Q; "Imaging the body with diffuse optical tomography"; *Signal Processing Magazine*; 57-75; 2001
- [5] Vasconcelos M N B; Tese Mestrado: "Implementação de um sistema para simulação por Monte Carlo de fotões através do olho humano"; *Faculdade de Ciências de Tecnologia*; Lisboa; 2007
- [6] Encyclopedia Britannica 2008; "eye, human"; Encyclopedia Britannica 2006 Ultimate Reference Suite DVD
- [7] www.wikipedia.org
- [8] van de Kraats J, van Norren D; "Directional and nondirectional spectral reflection from the human fovea "; *Journal of Biomedical Optics* 13; 2008
- [9] Osterberg G; "Topography of the layer of rods and cones in the human retina"; *Acta Ophthalmology*, Suppl. 13:6; 1-102; 1935
- [10] Guyton A G; "Human Physiology and Mechanisms of Disease"; 373; 1992
- [11] Kandel E R, Schwartz J H, Jessell T M; "Principles of Neuroscience - 4th Edition"; *McGraw-Hill*; 507-513; New York; 2000
- [12] Dr. J.DiBerardino, Dr. E.Rutyna and Associates - www.drdberberardino-assoc.ca
- [13] American Health Assistance Foundation – "Macular Degeneration Research"; (2009) www.ahaf.org/macular/
- [14] National Institutes of Health; National Eye Institute; "Age-Related Eye Disease Study" www.nei.nih.gov/amd/
- [15] Andrew P S, James L M; "An Introduction to Probability and Stochastic Processes"; *Prentice Hall Inc.*; Englewood Cliffs, New Jersey; 1973
- [16] Sobol' I M; "The Monte Carlo Method "; *The University of Chicago Press*; Chicago and London; 1974
- [17] Metropolis M, Ulam S; "The Monte Carlo method"; *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44 N° 247; 335-341; 1949
- [18] www.nist.gov

- [19] Hecht E; "Optics, 4th Edn"; Addison & Wesley; 2002
- [20] Santos, J P; "Apontamentos introdutórios à tese de mestrado"; 2009
- [21] Henyey I G, Greenstein J L; "Diffuse radiation in the galaxy"; *Astrophysics Journal*, Vol. 93; 70-83; 1941
- [22] Vitkin I A, Côté D; "Robust concentration determination of optically active molecules in turbid media with validated three-dimensional polarization sensitive Monte Carlo calculations"; *Optics Express*, Vol. 13, N°1; 148-163; 2005
- [23] Jacques S L, Alter C A, Prah S A; "Angular dependence of HeNe laser light scattering by human dermis"; *Lasers Life Science* 1; 309-333; 1987
- [24] Wang L, Jacques S L, Zheng L; "MCML – Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues"; *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 47; 131-146; 1995
- [25] Delori F C, Pflibsen K P; "Spectral reflectance of the human ocular fundus" *Applied Optics*, 28; 1061-1077; 1989
- [26] Gorrand J M; "Separation of the reflection by the Inner Limiting Membrane"; *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol.6; 187-196; 1986
- [27] Knighton R W, Jacobson S G, Kemp C M; "The spectral reflectance of the nerve fiber layer of the macaque retina"; *Investigative ophthalmology & visual science*, 30 (11); 2392-2402; 1989
- [28] Knighton R W, Baverez C, Bhattacharya A; "The directional reflectance of the retinal nerve fiber layer of the toad"; *Investigative ophthalmology & visual science*, 33 (9); 2603-2611; 1992
- [29] Hammer M, Roggan A, Schweitzer D, Müller G; "Optical properties of ocular fundus tissues – an in vitro study using the double-integrating-sphere technique and inverse Monte Carlo simulation"; *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 40; 963-978; 1995
- [30] Bülow N; "Light scattering by pigment epithelium granules in the human retina"; *Acta Ophthalmology*, 46; 1048-1053; 1968
- [31] Ham W T; "Remarks on fundus reflectance"; *Vision Research*, 15; 1167-11678; 1975
- [32] Vogel A, Dlugos C, Nuffer R, Birngruber R; "Optical properties of human sclera and their consequences for transcleral laser applications"; *Lasers in Surgery and Medicine*, 11; 331-340; 1991
- [33] Torczynski E; "Sclera "; *Biomedical Foundations of Ophthalmology*, Lippincott Williams & Wilkins; Philadelphia; 1988
- [34] Maurice D M; "The cornea and sclera"; *The eye*, Vol.1; Academic Press; New York; 1962
- [35] Hammer M, Schweitzer, D, Scibor M, Leistriz L, Hoffman B; "Comparison of different models for the radiative transfer to the human ocular fundus using a new technique for spectral reflectance measurement"; Proc. 4th Int. meeting on scanning laser ophthalmoscopy, tomography and microscopy; 1993
- [36] Hogan M J, Alvarado J A, Weddell J E; "Histology of the Human Eye"; *W.B. Saunders Company*; Philadelphia; 1971

- [37] van de Hulst H C; "Multiple Light Scattering"; *Academic Press*; New York, 1980
- [38] Prahl S A, Keijzer M, Jacques S L, Welch A J; "A Monte Carlo model of light propagation in tissue"; *SPIE Proceedings of Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology*, IS 5; 102-111; 1989
- [39] Giovanelli R G; "Reflection by semi-infinite diffusers"; *Acta Ophthalmology* 2; 153-162; 1955