



## **AValiação DE DESEMPENHO DO APOLUX COMO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL**

**Roberta Vieira Gonçalves de Souza (1); Diego Jaccques Lemes (2) Fernando Oscar Ruttkay Pereira (2); Anderson Claro (2)**

(1) Universidade Federal de Santa Catarina, R. Paraíba, 697 – Funcionários, BH/MG 30.130-140, Telefone: +31 3269 1851, fax: +31 3269 1822

E-mail: [roberta@arq.ufmg.br](mailto:roberta@arq.ufmg.br)

(2) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura, CTC, Campus Trindade, Florianópolis/SC +48 3319393.

### **RESUMO**

O Apolux é um programa de simulação totalmente desenvolvido no Brasil. É um programa desenvolvido a partir do método da radiosidade destinado à avaliação do desempenho de ambientes iluminados com luz natural.

No presente trabalho, os níveis de iluminância obtidos com o Apolux e também com o Lightscape 3.2 são comparados com medições feitas em maquetes sob uma gama de céus reais.

Os resultados mostram que o Apolux apresenta uma boa reprodução de níveis de iluminação, sendo seus resultados tão precisos – ou em alguns casos melhores - quanto os apresentados pelo Lightscape 3.2, uma ferramenta de simulação de iluminação já estabelecida.

### **ABSTRACT**

Apolux is a design tool totally developed in Brazil to simulate daylight environments. It uses radiosity modelling in order to calculate daylight inner distribution.

In the present paper, the daylight illuminance levels obtained by Apolux and also by Lightscape 3.2 are compared with measured values scale models data, under real skies.

Results have shown that Apolux presents a very good reproduction of daylighting levels of real environments and results as good as - or even better in some cases – than results presented by Lightscape 3.2, an established daylighting evaluation tool.

### **1. INTRODUÇÃO**

Diferentemente de outros programas de simulação de iluminação natural, que foram primeiramente desenvolvidos para permitir a visualização tridimensional de espaços e posteriormente incorporaram iluminação natural e artificial, o programa Apolux foi especialmente desenvolvido para a avaliação de luz natural em ambientes. Tal fato traz algumas vantagens que outras ferramentas de simulação não oferecem, tais como controle dos níveis de iluminação externa, do grau de turvamento da atmosfera, acesso direto a dados de componente celeste e de componente refletida, entre outros.

Antes que as simulações sejam feitas, pode se acessar níveis externos de iluminação e nos primeiros estágios de processamento pode se verificar os valores devidos à componente celeste. Tal processo

permite a realização de pré análises de distribuição de luz sem a necessidade de se esperar que todo o processo de simulação esteja completo. Após terminada a simulação pode-se acessar valores globais e das componentes celeste e refletida em tabelas, o que permite a exportação de valores para outras ferramentas de análise ou para um programa de planilha eletrônica. É possível ainda a visualização de curvas isolux e da distribuição de luminâncias.

O programa, desenvolvido a partir do método da radiosidade (CLARO, 1998), permite ao usuário escolher entre uma série de níveis de precisão, tanto com relação à discretização das superfícies quanto para a discretização da abóbada celeste. Permite uma precisa definição de cores e características de reflexão dos materiais além de possibilitar uma checagem passo a passo do progresso da simulação. A componente celeste é calculada a priori e sua análise permite ao usuário iniciar a correção do projeto, caso erros de concepção ou desvios não esperados sejam encontrados nesta etapa. Esta análise inicial da componente celeste evita que se tenha que passar por todo o processo de simulação, que pode levar até algumas horas, em função da complexidade do projeto e grau de precisão especificado. O usuário pode especificar quantas interações o programa fará para distribuir a luz refletida através do ambiente. A visualização da imagem final obtida pode ser controlada por um equalizador gráfico que permite o ajuste de 10 grupos de cores. Há uma rotina denominada “Vetor Fóton” que permite a visualização da direção do vetor iluminância. Esta rotina possibilita a verificação das diferenças de brilho campo visual do observador, que é representado como uma cena vista através de uma lente olho de peixe. Em caso do uso do programa para pesquisa, pode-se acessar separadamente a componente direta da componente difusa. Todas as ferramentas mencionadas acima fazem com que seja possível se realizar uma série de pesquisas em iluminação natural com acesso direto a dados que outros programas não permitem acessar tão facilmente e permite inclusive a verificação mais precisa do desempenho do programa quando este é comparado a medições reais (Claro et al, 2003).

Estas comparações com medições são mais difíceis de se fazer com outros programas de simulação de iluminação natural porque estes, em geral, não permitem o acesso direto aos níveis de iluminância externa obtidos pelo algoritmo para determinado dia e condição de céu e muito menos permitem o seu controle como faz o Apolux

Este controle é feito no programa através das ferramentas de controle de turvamento e cobertura de nuvens. Estas ferramentas, juntamente com a definição de uma condição de céu básica (claro, encoberto ou parcialmente encoberto) permitem que se faça uma representação mais próxima de valores de iluminância medidos e portanto, os valores de iluminâncias interiores obtidos pela simulação podem ser diretamente comparados com valores medidos, sem a necessidade do uso de fatores de correção, para corrigir distorções nas iluminâncias externas e internas em relação ao céu real.

## **2. MEDIÇÕES**

Os resultados obtidos em simulações com o Apolux são comparados com medições feitas em modelos em escala e também com simulações feitas pelo programa Lightscape 3.2. As medições em modelos em escala foram feitas simultaneamente a medições de iluminâncias externas.

### **2.1 O modelo em escala**

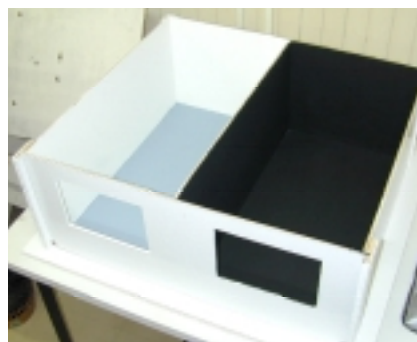
A maquete das salas simuladas foi construída em escala 1:10, representando uma sala de 3,3 x 6,0 m com pé direito de 2,8 m em que foram inseridos dois tipos de abertura: uma que representa 30% da área da parede em que está inserida (30% WWR) e outra que representa 50% desta área (50% WWR). As paredes internas dos modelos foram pintadas com tinta látex fosca nas cores branco, cinza claro e cinza escuro, com refletâncias 0,73, 0,32 and 0,17 respectivamente, como mostra a Figura 1.

A sala foi dividida em nove áreas iguais e as iluminâncias foram medidas e simuladas para o centro de cada uma destas áreas, de forma que são medidos 3 pontos próximos à janela, 3 pontos no meio do ambiente, e 3 pontos no fundo do ambiente.

## 2.2 Medições

As medições externas foram feitas pela Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis, EMIN-FLORIPA, latitude 27° 39' 40". Esta estação segue o padrão IDMP – International Daylighting Measurement Programme (SOUZA E PEREIRA, 2004; SOUZA, 2004).

As medições de iluminâncias internas foram feitas em modelos em escala, como o da Figura 1, sob várias condições de céu e simultaneamente a medições de iluminâncias externas difusas e globais. Todas as medições representam médias de um minuto de medidas tomadas a cada 5 segundos.



**Figura 1 - Modelo em escala com abertura de 30% WWR.**

## 2.3 Comparações

Para que se fizesse a avaliação do desempenho do Apolux, foram tomadas medições de nove diferentes combinações de condições meteorológicas, refletividades dos ambientes e proporções de aberturas. Desta maneira o desempenho dos programas Apolux e Lightscape 3.2 pode ser avaliado sob céus claros e encobertos, para três refletividades diferentes, para dois tamanhos de abertura e também sob céus encobertos muito claros ou muito escuros, como pode ser visto na Tabela 1.

**Tabela 1 – Comparações feitas na simulação do Apolux e Lightscape 3.2 com valores medidos**

COMPARAÇÃO	PARÂMETROS	CÉU CLARO	CÉU ENCOBERTO
Refletividade	Sala Branca	Dez. 1, 11:20	Nov. 18, 13:55
	Sala Cinza Claro	Fev. 5, 09:47	Dez.14, 10:42
	Sala Cinza Escuro	Out.18, 15:27	Out. 18, 16:14
WWR	WWW 30%		Nov.18, 13:55, Sala branca.
	WWW 50%		Dez. 2, 09:38, Sala branca.
Brilho do céu	Baixo		Dez. 15, 10:00, Sala cinza claro.
	Alto		Fev. 5, 11:20, Sala cinza claro.

Um fator de correção dado pela divisão da iluminância externa global medida pela iluminância externa global dada pelo programa Lightscape foi aplicado aos valores internos de forma que as comparações pudessem ser feitas tomando-se como base a mesma iluminância externa. No Apolux foram comparadas as iluminâncias difusas externas, já que o programa fornece estes valores diretamente.

A próxima seção traz os resultados e comentários sobre o desempenho tanto do Apolux quanto do Lightscape 3.2 para cada uma das situações selecionadas.

## 3. RESULTADOS

As Figuras de 2 a 10, no fim deste artigo, apresentam a distribuição de luz natural obtida por medição e pela simulação com cada um dos programas, para cada um dos dias selecionados. São apresentados

os valores de iluminâncias internas,  $E_i$ , obtidas para os correspondentes valores de  $E_g$ ,  $E_{g,}$  e  $E_d$ ,  $E_{g,}$  iluminância global e difusa, respectivamente. O objetivo foi verificar se os programas conseguiram reproduzir adequadamente iluminâncias, a forma de distribuição da luz e o decaimento da luz à medida em que se afasta da abertura.

A Figura 2 mostra a sala branca, sob céu claro. Pode-se perceber claramente que os valores obtidos na maquete são bem mais elevados que os obtidos nas duas simulações. Outro fator que chama a atenção é, que no ambiente real, a luz é melhor distribuída que nas simulações. As diferenças entre valores simulados e medidos podem chegar a 52% perto da janela e no Apolux podem ultrapassar 78% nos pontos mais afastados da janela.

Nas Figuras 3 e 4 em que são analisadas respectivamente as salas cinza claro e cinza escuro sob céu claro, melhores resultados são encontrados. Ambos os programas tendem a reproduzir adequadamente a distribuição da luz, o Apolux apresentando subestimação e o Lightscape apresentando superestimação em pontos afastados da abertura. Os valores próximos à janela tendem a ser subestimados e o Lightscape não reproduz bem a entrada lateral da luz no ambiente, apresentando uma distribuição simétrica a partir do centro da abertura.

As Figuras de 5 e 7, novamente mostram as salas branca, cinza claro e cinza escuro, mas desta vez, iluminadas sob condição de céu encoberto. Ambos os programas reproduzem adequadamente a distribuição de luz, com o Apolux tendendo a subestimar valores afastados da abertura. Na sala branca, ambos os programas reproduzem bastante adequadamente valores próximos à abertura, enquanto nas salas cinza claro e cinza escuro, eles tendem a subestimar em aproximadamente 35% estes valores.

As Figuras de 5 e 8 permitem que se faça a comparação entre a sala branca com 30 ou 50% WWR. Maiores diferenças em relação aos valores medidos e simulados são encontrados nas simulações com o Lightscape 3.2 quando as janelas são maiores, com 50% da área da parede em que estão inseridas. Nesta situação, o Lightscape 3.2 tende a deixar os valores bem mais uniformes do que os medidos em maquete. Novamente o Apolux tende a subestimar valores no fundo dos ambientes, mas representa bastante bem os valores próximos à abertura.

Quando um brilho de céu muito alto ou muito baixo é encontrado sob condição de céu encoberto (com iluminâncias difusas externas da ordem de 40 klux e 5 klux, respectivamente), apenas o programa Apolux permite o controle do brilho de céu de forma a que os valores simulados se aproximem dos valores externos medidos.

Para céus encobertos de baixa luminosidade, ambos os programas tendem a subestimar as iluminâncias internas, em todo o ambiente. As diferenças variam de uma subestimação de 50% em pontos próximos à janela podendo chegar a até 88% de subestimação em pontos mais afastados da janela. Ambos os programas apresentam um comportamento similar neste caso.

Para céus encobertos muito brilhantes, o Apolux é o que melhor reproduz a distribuição de iluminâncias, enquanto o Lightscape tende a superestimar os valores em todo o ambiente, especialmente em pontos mais afastados da abertura, apresentando valores mais do que 100% mas elevados do que a maquete nesta área.

Em termos gerais, foi verificado que o Apolux tende a subestimar os valores de iluminância em pontos afastados da abertura, mas ao mesmo tempo é o programa que melhor reproduz a direção da entrada da luz, o que o Lightscape 3.2 falha em fazer.

#### **4. CONCLUSÕES**

Este artigo mostrou o comportamento do programa Apolux para simulação de iluminação natural, onde os valores obtidos em sua simulação são comparados a valores medidos em maquete e também comparou seu desempenho frente a um programa para simulação de iluminação natural internacionalmente reconhecido, o Lightscape 3.2.

O Apolux mostrou um desempenho considerado bom na predição de iluminâncias internas, embora este desempenho varie de acordo com a situação analisada. Em geral para valores médios de iluminâncias difusas externas (de 10 a 20 klux), o programa consegue reproduzir adequadamente a distribuição de luz no ambiente interno, com ligeira subestimação em pontos mais afastados da

abertura. Diferentemente do Lightscape 3.2, que tende a apresentar uma distribuição de luz simétrica em relação ao centro da abertura, o Apolux conseguiu reproduzir a “lateralidade” da entrada de luz no ambiente interno, nos pontos próximos à abertura, como acontece sob condição de céu claro em que um lado da abóbada é mais “luminoso” que o outro e há uma correspondência desta diferença de luminosidade no ambiente interno (ver Figuras 3 e 4). Em algumas circunstâncias, sob céu encoberto, a entrada da luz natural no ambiente interno também apresenta uma certa lateralidade sob céu real (ver Figuras 7, 8 e 9). Tal se deve a haver diferenças na distribuição da luz na abóbada celeste, provavelmente devido a não homogeneidade na cobertura das nuvens. Neste caso, em função do modelo matemático para a descrição de céu encoberto não apresentar diferenças azimutais na distribuição da luz na abóbada celeste, ambos programas não reproduzem as condições apresentadas sob céu real, o que era de se esperar.

Sob céu claro, ambos os programas tendem a apresentar um comportamento semelhante quando comparados a valores medidos, especialmente quando a distribuição da luz é analisada. Sob céu encoberto, o Apolux tendeu a apresentar uma maior subestimação de valores no terço médio mais afastado da abertura do que o Lightscape 3.2. Por outro lado, quando analisadas simulações para altos valores de refletividade das paredes e teto internos (sala branca) o Lightscape apresentou uma distribuição de luz mais uniforme do que o medido na maquete sob céu real.

Em geral, acredita-se que o Apolux, embora apresente desvios dos valores medidos, tenha mostrado ser uma ferramenta bastante eficaz na predição do comportamento da iluminação natural em ambientes internos. Ele também mostrou desempenho semelhante ao do programa lightscape 3.2, considerado como sendo uma ferramenta da simulação de iluminação natural confiável. As vantagens do Apolux são permitir um controle passo a passo da simulação, permitir o acesso direto a dados de iluminância externa e o controle do brilho do céu. Estas características fazem com que o programa se torne uma poderosa ferramenta em pesquisas sobre iluminação natural de ambientes e uma ferramenta de uso mais simplificado para a realização de comparações com valores medidos.

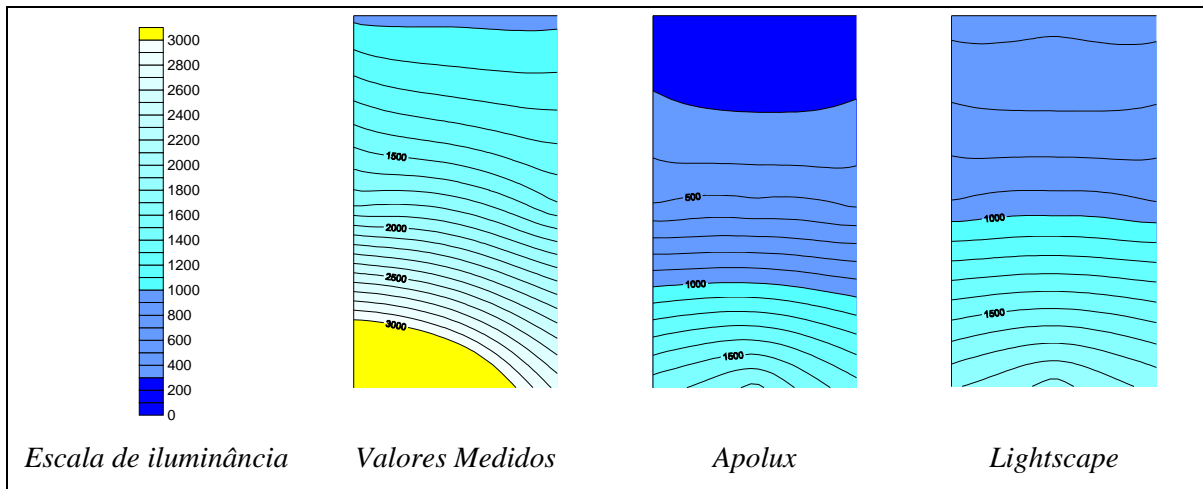
As diferenças verificadas entre os valores reais medidos e os valores simulados pelo programa devem-se principalmente a limitações inerentes ao próprio algoritmo do programa. O método da radiosidade considera que a luz incidente em cada superfície será homogeneamente distribuída em todas as direções. Sabe-se, no entanto, que em ambientes reais esta luz poderá apresentar uma maior diretividade, o que provavelmente pode justificar a maior presença de luz no fundo dos ambientes do que o apresentado pelas simulações. O ideal seria um algoritmo que integrasse tanto rotinas de radiosidade quanto de ray-tracing, que permitissem uma reprodução mais precisa do comportamento da luz natural. A questão está então em verificar o custo-benefício desta decisão em termos de processamento e precisão final obtida.

## **5. AGRADECIMENTOS**

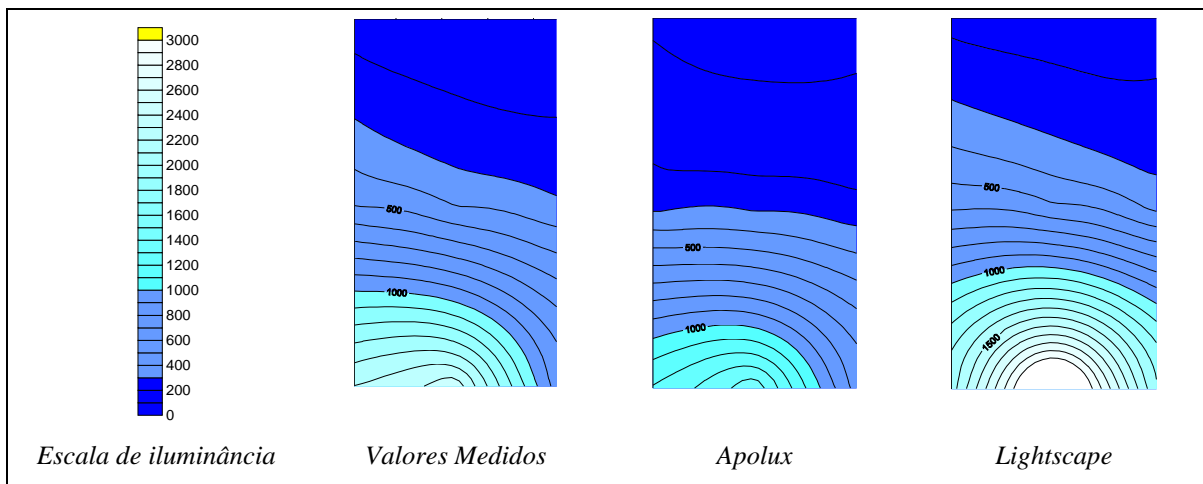
Gostaríamos de agradecer ao Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade de Santa Catarina, LABCON/UFSC.

## **6. REFERÊNCIAS**

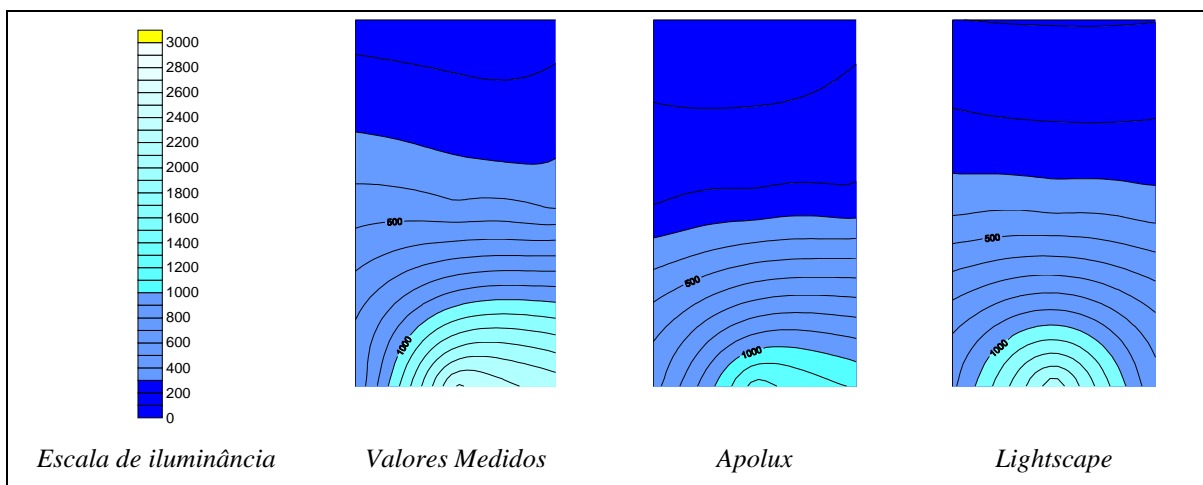
- CLARO, A. (1998) Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade aplicado à Iluminação Natural. Tese de Doutorado. CTC/UFSC, Florianópolis.
- CLARO, A.; PEREIRA, F. O. R.; AGUIAR, G. P. (2003) Desenvolvimento do protótipo do programa Luz Solar para análise de iluminação natural em arquitetura. 2º Fórum de Pesquisa e desenvolvimento - CELESC, Florianópolis.
- SOUZA, R. V. G. (2004) Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a caracterização dos fenômenos de iluminação natural interna e externa. Tese de doutorado, PPGEC, CTC/UFSC, Florianópolis.
- SOUZA, R. V. G.; PEREIRA, F. O. R. (2004) Primeira estação de medição de iluminação natural em território Brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento, Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 79-94.



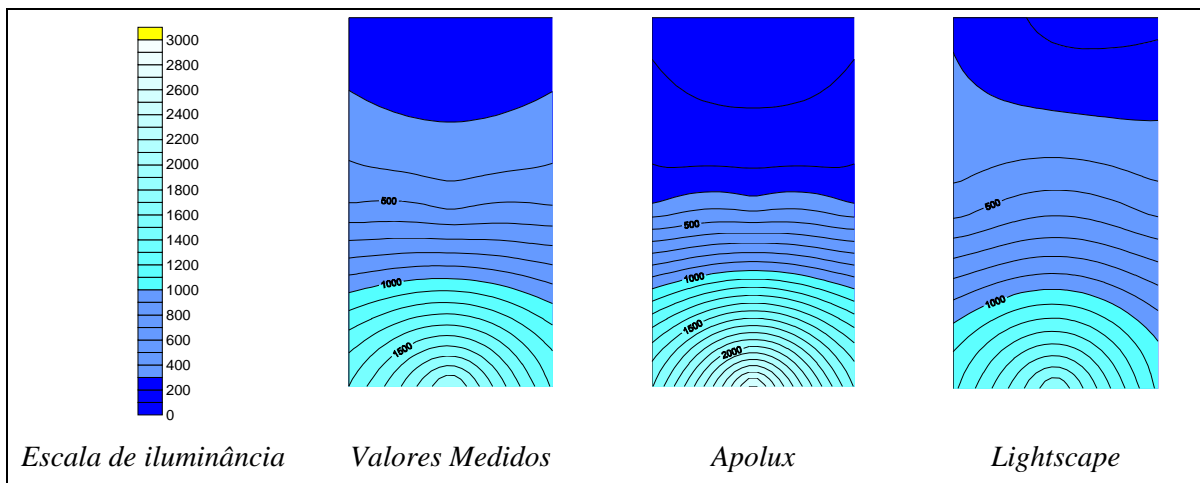
**Figura 2 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala branca, WWR 50%. Céu claro, Dezembro 1, 11:20.  $E_g$ : 107.500 lux;  $E_d$ : 13.108 lux.**



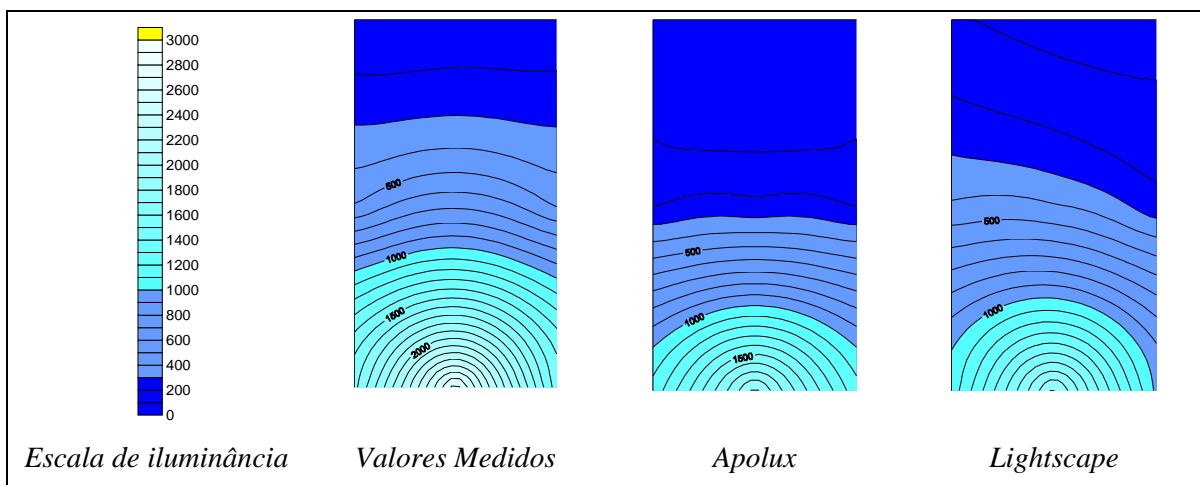
**Figura 3 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza claro, WWR 30%. Céu claro, Fevereiro 5, 09:47.  $E_g$ : 92.988 lux;  $E_d$ : 13.169 lux.**



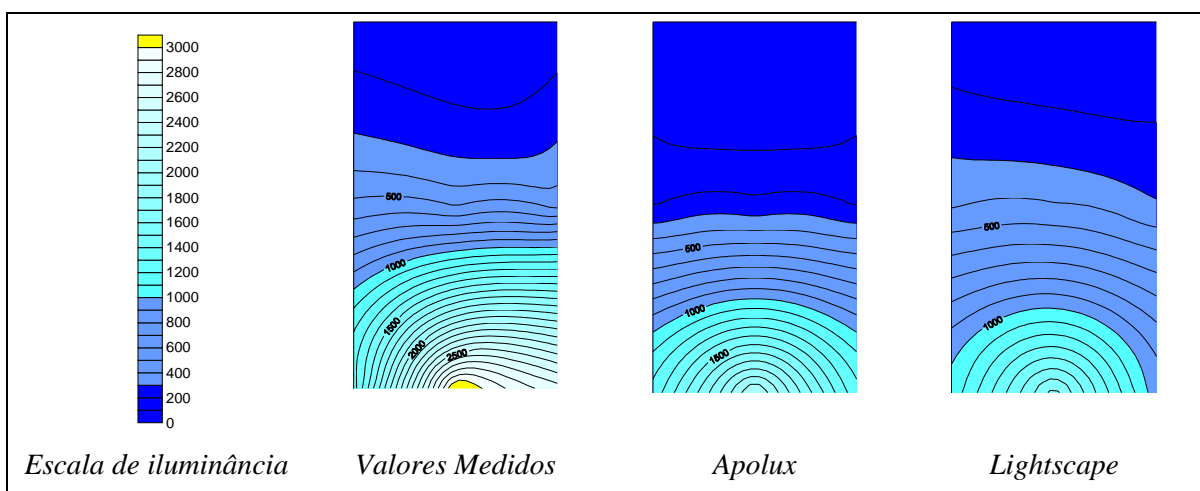
**Figura 4 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza escuro, WWR 30%. Céu claro, Outubro 18, 15:27.  $E_g$ : 71.600 lux;  $E_d$ : 11.300 lux.**



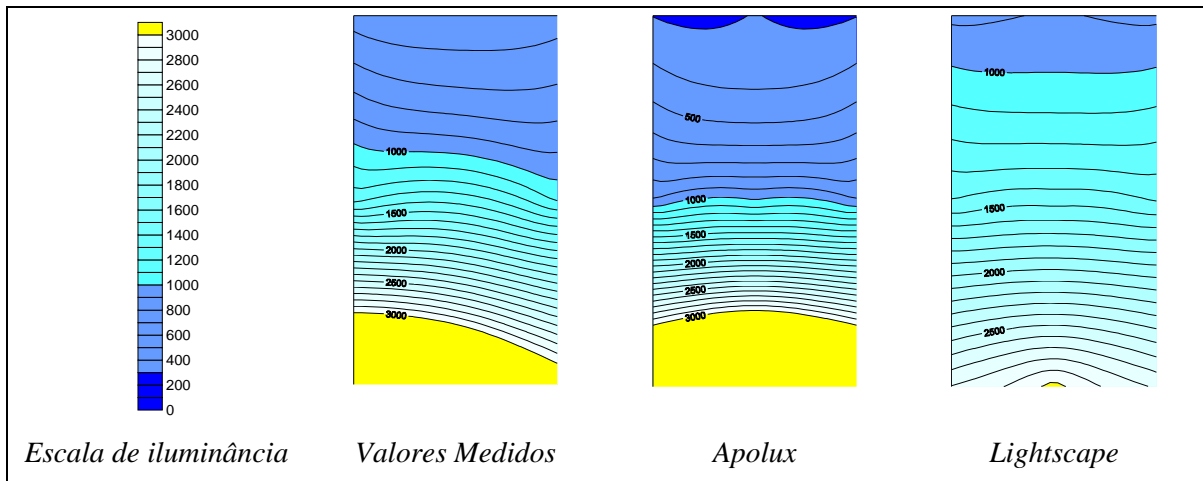
**Figura 5 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala branca, WWR 30%. Céu encoberto, Novembro 18, 13:55.  $E_g$ : 21.930 lux;  $E_d$ : 17.799 lux.**



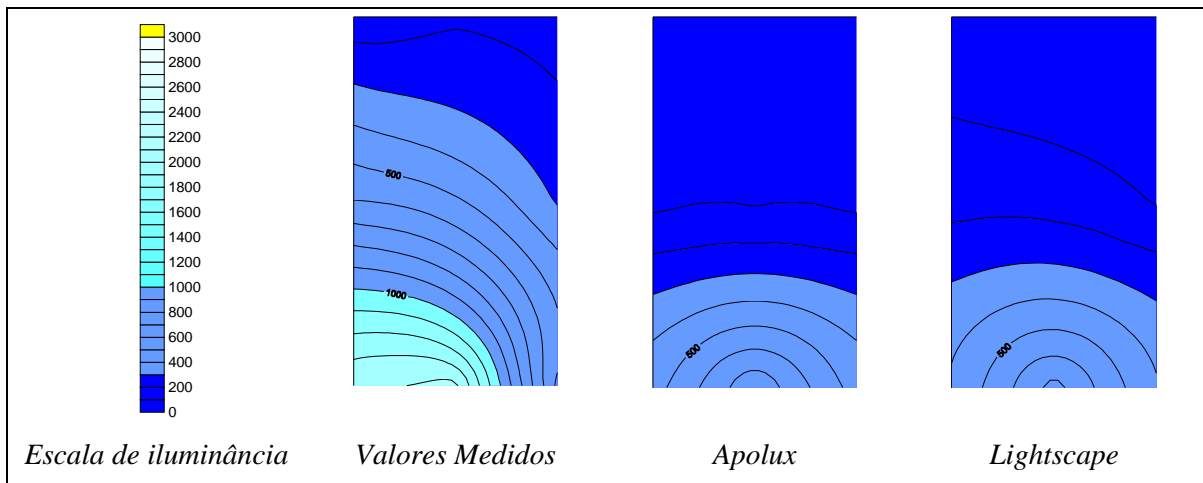
**Figura 6 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza claro, WWR 30%. Céu encoberto, Dezembro 14, 10:42.  $E_g$ : 15.050 lux;  $E_d$ : 13.150 lux.**



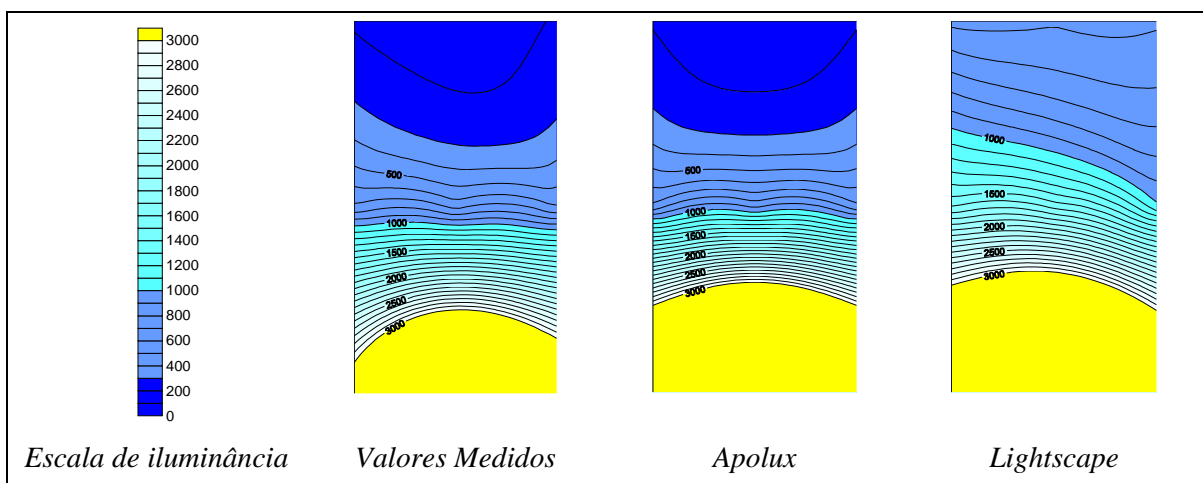
**Figura 7 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza escuro, WWR 30%. Céu encoberto, Outubro 18, 16:14.  $E_g$ : 24.287 lux;  $E_d$ : 14.515 lux.**



**Figura 8 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala branca, WWR 50%. Céu encoberto, Dezembro 2, 09:38.  $E_g$ : 21.930 lux;  $E_d$ : 17.800 lux.**



**Figura 9 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza claro, WWR 30%. Céu encoberto, Dezembro 15, 10:00.  $E_g$ : 6.310 lux;  $E_d$ : 5.354 lux.**



**Figura 10 - Comparações entre valores medidos e simulados pelo Apolux e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza claro, WWR 30%. Céu encoberto, Fevereiro 5, 11:20.  $E_g$ : 69.220 lux;  $E_d$ : 50.740 lux.**