

## FILTROS DE CONTROL SOLAR SOBRE SUPERFICIES VIDRIADAS. EVALUACIÓN LUMÍNICA MEDIANTE METRICAS DINÁMICAS Y PREFERENCIA DE USUARIOS.

A.M. Villalba, J. M. Monteoliva, A. E. Pattini, y J. A. Yamín

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (LAHV-INCIHUSA)  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Centro Científico y Tecnológico – CCT C.C.131 C.P. 5500 – Mendoza  
Tel. 0261-5244322 – Fax 0261-5244001 e-mail: [avillalba@mendoza-conicet.gov.ar](mailto:avillalba@mendoza-conicet.gov.ar)

*Recibido: 4-08-11; Aceptado: 4-09-11.*

**RESUMEN.-** La radiación solar directa requiere la mediación del diseño para su control, para evitar situaciones de incomodidad visual que conllevan al bloqueo de los aventanamientos, generando espacios sombríos que requieren de energía eléctrica para la iluminación, resultando energéticamente no sustentables. El presente trabajo evalúa mediante métodos objetivos y subjetivos el factor de iluminación y la percepción visual en un espacio completamente vidriado y las consecuencias de aplicar en el mismo, filtros de control solar. El uso de estos últimos produce un aumento de 0.58KWh/ m<sup>2</sup> para alcanzar la iluminancia necesaria diurna por otra parte provocan importantes modificaciones en la percepción. Asimismo reflexiona sobre la importancia del uso de métricas dinámicas como parámetros más representativos del acondicionamiento lumínico natural de los espacios en climas soleados, destacando la necesidad de concienciar a los profesionales proyectistas de la importancia del uso de la iluminación natural como recurso disponible para el adecuado acondicionamiento lumínico en espacios interiores y su consecuente ahorro energético.

**Palabras claves:** iluminación natural, filtros de control solar, percepción visual, métricas dinámicas.

### SOLAR CONTROL FILMS ON GLASS SURFACE. DAYLIGHT EVALUATION WITH DYNAMIC METRICS AND USERS PREFERENCES.

**ABSTRACT.-** Direct solar radiation requires the mediation of design for its control, to avoid situations of visual discomfort that lead to blocking windows, generating dark spaces that require electricity for lighting, becoming unsustainable. This work evaluates through objective and subjective methods illumination factor and visual perception in a fully glazed space and the consequences of applying in the space solar control filters. It also reflects on the regional validity of the metrics for analysis of natural lighting. Stressing the need to raise awareness among professional designers of the importance of using natural lighting, for adequate interior lighting and consequent energy savings. It also proposes professionals to incorporate dynamic climate based evaluation.

**Key words:** daylighting, solar control filters, visual perception, dynamic metrics

#### 1. INTRODUCCIÓN

La iluminación natural es claramente preferida ante la iluminación artificial como fuente de iluminación (Galasius y Veitch, 2006; Boyce, 2003). Las ventanas son particularmente valoradas por la iluminación natural y la vista al exterior que proveen (Boyce, 2006). El diseño de edificios que contemplan principalmente el uso de la luz natural como fuente principal de iluminación, pueden generar grandes beneficios en los usuarios. Entre ello, contribuir a la puesta en marcha del sistema circadiano (Webb, 2006), a la calidad de iluminación de un espacio y hasta una mayor tolerancia en situaciones de deslumbramiento, que si la fuente fuese artificial (Chauvel y Dogniaux, 1982), situación que se complementa con importantes ahorros energéticos, cuando se utiliza la luz

natural controlada como fuente de iluminación de un espacio. Sin embargo es importante en ambientes como una biblioteca alcanzar una situación de confort visual, resultando fundamental controlar el nivel de iluminancia del espacio, el índice de deslumbramiento y la distribución espacial de la luz natural (Anon, 2000; Pattini, 2009).

“Las recomendaciones visuales basadas únicamente en parámetros de capacidad visual son generalmente incorrectos”. (Boyce, 2006). Estos valores no son totalmente representativos sin ser contrastados con las ponderaciones o valoraciones del usuario, permitiendo así llegar a un balance entre los parámetros de eficiencia de la tarea evaluada, con factores de confort del usuario. De lo contrario, es probable que el resultado final no sea satisfactorio. Por otro lado el factor de luz diurna (DF), la vista al exterior, y en algunos

casos, la direccionalidad del sol; son actualmente los únicos indicadores, como parámetros objetivos, utilizados para implementar los análisis y evaluaciones de la iluminación natural en un edificio. ¿En qué medida el uso de estas métricas conduce a un buen diseño o análisis del espacio? Como resultado de la problemática planteada anteriormente, y la necesidad de acercarnos a un análisis más precisos y representativos del factor de iluminación natural; se propone el uso de "métricas dinámicas". Actualmente denominadas *métricas de desempeño dinámico de la iluminación natural* (dynamic daylight performance metric) (Reinhart et al., 2006).

Mendoza se caracteriza por la gran cantidad de días soleados al año (Betman, 2001). Esta elevada radiación solar directa requiere la mediación del diseño para su control, para evitar situaciones de falta de confort térmico y visual que conllevan al bloqueo de los aventanamientos generándose espacios sombríos que requieren de energía eléctrica para la iluminación diurna, tornándose espacios energéticamente no sustentable (Pattini, 2009). Situación que con frecuencia encontramos en aquellos espacios a los que se les asignan funciones arquitectónicas para las que no han sido creados. En estos se proponen soluciones paliativas, sin considerar a priori las funciones de uso que se realizarán en la nueva distribución del espacio.

Estos edificios tienen un impacto en el ambiente a macroescala en términos de los recursos que utilizan, pero también tienen un impacto en el microclima de su entorno inmediato. A medida que se convierten más y más en superficies de reflexión, generan efectos negativos hacia el entorno urbano próximo desde lo visual y térmico (Schiler, 2000). Sin embargo vemos que la tendencia arquitectónica de los últimos años en la ciudad de Mendoza responde a edificios que tienen el 100% de sus aberturas cubiertas con filtros espejados. Asimismo los filtros modifican el color de la luz natural, generando en los usuarios, de espacios interiores con filtros en sus aventanamientos, incertidumbre sobre las condiciones del clima exterior y desorientación temporal (hora del día) (Edwards y Torcellini, 2002). A esto se suma, para los usuarios permanentes, los efectos que causa el no estar expuestos a niveles de iluminación, lo suficientemente elevados, sobre el funcionamiento del sistema circadiano (Tonello, 2010). La actitud de los usuarios y su vinculación con la regulación de los sistemas de control de solar y de iluminación, también tiene un impacto muy relevante en el consumo de energía eléctrica. Esta relación causa grandes modificaciones en los consumos, llegando en determinadas situaciones a producir aumentos en lo consumos eléctricos por encima del 60% (Japee y Schiler, 1995).

Este trabajo apunta a evaluar el ambiente lumínico de un espacio al cual se le ha asignado un uso para el que *no fue concebido*. A tal efecto se realizó: una caracterización fotométrica con métricas dinámicas (métodos objetivos), análisis de la percepción de los usuarios respecto a la iluminación natural (métodos subjetivos) y la correlación que existe entre estos dos aspectos (objetivos y subjetivos).

Asimismo, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, se propone evaluar el comportamiento del espacio aplicando un sistema de control solar independiente de los usuarios y de uso cada vez más frecuente: el filtro de control solar.

## 2. CASO DE ESTUDIO

El espacio seleccionado para realizar esta evaluación es una sala de estudio, perteneciente al edificio de docencia de la Facultad de Artes y Diseño (FAD) de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo). Dicho edificio se encuentra emplazado en el Centro Universitario de la UNCuyo, en la provincia de Mendoza (32.52.49 S, 68.52.45 E -853msm-) a 10km de la capital, sitio donde la densidad edilicia es baja, no hay obstrucciones a los aventanamientos generadas por edificios cercanos, y el arbolado es muy escaso, siendo el acceso al sol pleno (fig. 1 y 2). Presenta una arquitectura de bloque compacto con ventanas orientadas al norte y al sur con una superficie vidriada de aproximadamente un 65%.

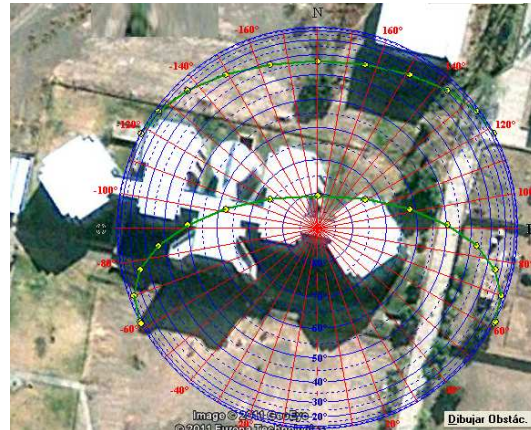


Fig. 1: emplazamiento del edificio de la FAD, UNCuyo con la carta solar-invierno y verano.

El espacio elegido para efectuar el estudio fue inicialmente pensado como un espacio de circulación, posee aventanamiento norte y sur de piso a techo, siendo la orientación norte la que recibe la mayor cantidad de radiación solar anual, por lo que reproduce con mayor similitud el espectro visible completo, a su vez que respeta las variaciones estacionales. A esto se le agrega el aporte de la orientación sur, con valores más constantes a lo largo del año, pero no alcanzando los niveles recomendados. (Pattini, 2009).

## 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada podemos dividirla en tres etapas principales: (1) Relevamiento físico y fotométrico del caso de estudio in situ, (2) Simulaciones y análisis de métricas dinámicas (modelos virtuales); y por último, (3) Modelos a escala y análisis subjetivos.

### 3.1 Relevamiento físico y fotométrico del espacio

Para caracterizar el espacio físico, fueron relevadas las dimensiones generales del recinto (8.3m x 4.8m x 2.95m), como así también las de su mobiliario. Éste consta de seis mesadas de trabajo de 1.20m x 0.7m x 0.8m distribuidas a los laterales (N- S) de la sala de estudios; dejando una zona central de circulación. En cuanto a las sillas, sus dimensiones son de 0.80m x 0.40m x 0.40m y se encuentra distribuidas de 4 por mesada (dos por lado) (fig. 2).

En cuanto a las características fotométricas, y específicamente la información concerniente a las

propiedades ópticas de las superficies, fue obtenida a partir de mediciones *in situ*. Se determinaron las luminancias de los materiales predominantes en el ambiente, para caracterizarlos a partir de sus reflectancias en el modelo virtual. Estas mediciones se llevaron a cabo de acuerdo al protocolo de medición de Fontoynt (1999). El instrumental empleado fue un luminancímetro Minolta LS 110 (ángulo de lectura de 1/3° y rango de medición de 0.01 a 999.900 cd/m<sup>2</sup>) y cartillas patrón.

Debido a las tipologías de tareas realizadas -tareas moderadamente críticas y prolongadas, con detalles medianos (IRAM AADL J 2006)-, se realizaron mediciones de iluminancias a la altura del plano de trabajo (80 cm del piso por norma). La grilla de medición fue de nueve puntos: seis corresponden a los espacios de trabajo mencionados anteriormente; y tres correspondientes al área de circulación (fig. 3). El instrumental empleado fue: radiómetro Licor LI-189 y sensor fotométrico Li-210. Las mediciones de iluminancia se efectuaron a las 11:30, hora estándar para el día siete de julio. Posteriormente los datos obtenidos en este relevamiento fueron empleados como patrón de calibración del modelo virtual de simulación.

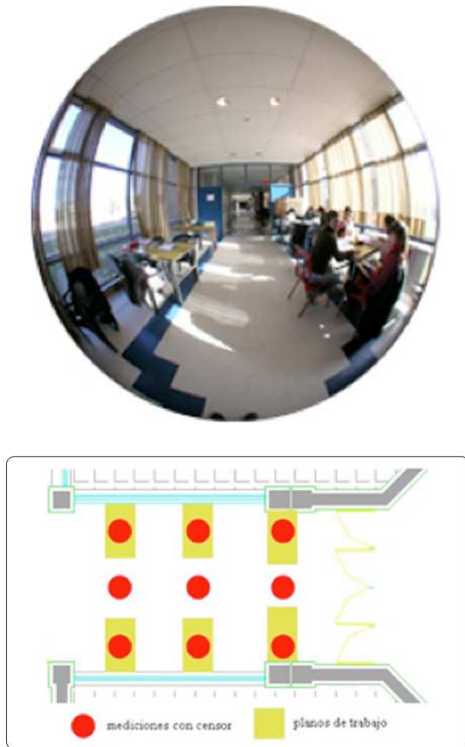


Fig. 3: grilla de medición de iluminancias.

### 3.2. Simulaciones y análisis de métricas de iluminación natural.

Las simulaciones fueron desarrolladas en su totalidad utilizando RADIANCE Desktop (Sistema de Simulación de Iluminación) (Ward y Shakespeare, 1998) y DAYSIM (Reinhart, 2006). Además se emplearon tres programas auxiliares: Autodesk AutoCAD (construcción de la maqueta virtual, espacio y mobiliario), Optics5 (librería de materiales translúcidos) y Meteonorm (generación de archivos de clima regional ARG\_Mendoza).

#### 3.2.1 Simulaciones RADIANCE

RADIANCE Desktop es un software que permite evaluar las estrategias de iluminación natural desde el punto de vista energético y de confort, desarrollado por el Departamento de Tecnologías de Construcción de Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) y usado en estudios previos y validado (Bulow-Hube, 2008; Jarvis y Donn, 1997).

A partir del relevamiento realizado *in situ*, de las reflectancia de las superficies, se crearon los materiales para el modelo virtual por medio de la interfaz de AutoCAD. Ésta permite asignar a los elementos las reflectancias calculadas mediante los datos de luminancia relevados en el espacio real. Asimismo se tomó como parámetro complementario de calibración, las mediciones de iluminancia tomadas en el espacio, estableciendo en la maqueta virtual, un grillado de nueve puntos idéntico al empleado en las mediciones *in situ*. Desde el punto de vista de la ubicación geográfica se cargaron en el simulador las coordenadas geográficas del lugar, como así también se contempló el corrimiento de 11 grados del norte hacia el este que presenta el edificio. El modelo de cielo usado, fue el CIE Claro otorgado por el programa. Tipología de cielo que mejor se corresponde con el clima luminoso característico de Mendoza.

Si bien el software RADIANCE Desktop posee una librería de materiales opacos y una de materiales translúcidos, los filtros que se decidieron emplear, debido a su frecuente uso regional, (fxst35, fxst20 y el p18ar de 3M Corporation) no estaban disponibles en la librería del software. Por esa razón se necesitó de la librería de materiales disponibles en el Optics5 (LBNL).

Finalmente, los cálculos generados por RADIANCE se obtuvieron para cada uno de los cuatro escenarios (vidrio CLEAR2 LO, filtro fxst35, fxst20 y p18ar) con intervalos de dos horas a partir de las diez de la mañana hasta las dieciocho horas (horario de atención al público) para el 21 de junio. Este período fue elegido por ser la época del año más crítica debido a profunda penetración de la radiación solar. Los mapeos de luminancia y de iluminancia del modelo virtual se generaron para las 11:30 horas del día 21 de junio, por ser este el horario más crítico, no sólo por la ubicación y orientación del edificio; sino también por su volumetría con entrantes y salientes. Asimismo se realizaron los cálculos para los nueve puntos de la grilla para el mismo horario y fecha.

#### 3.2.2. Simulaciones DAYSIM

DAYSIM es una herramienta basada en RADIANCE Desktop desarrollada por el Consejo Nacional de Investigación de Canadá en coparticipación con el Instituto Fraunhofer de Energía Solar de Alemania. La utilidad DAYSIM utiliza métodos de optimización de cálculo de iluminancia y distribución bajo distintas condiciones climáticas, a lo largo del tiempo y con el modelo Pérez de cielo. Las métricas para iluminación natural calculadas por DAYSIM son: DF (coeficiente de luz diurna), DA (luz natural autónoma), DAcon (luz natural autónoma continua), UDI (iluminación natural útil), DSP (porcentaje de saturación de luz natural) y Exposición de luz natural anual. Todos estos índices nos permiten un conocimiento dinámico de la iluminación natural de las condiciones del espacio. Asimismo genera automáticamente horarios de

ocupación de los espacios, cargas eléctricas de alumbrado y el estado de sistemas de control, de acuerdo a comportamientos activos o pasivos de los ocupantes. Así también estos resultados pueden ser exportados a programas de simulación térmica como TRNSYS, EnergyPlus, eQuest y Esp-r.

Para trabajar con esta herramienta, fue necesario en primera instancia, conocer y determinar los *input* necesarios para su ejecución. Éstos fueron los siguientes: geometría RADIANCE y archivos de materiales, distribución y cantidad de puntos de medición y archivo con información climática (extensión EnergyPlus). Al trabajar en conjunto con RADIANCE, la geometría (\*.rif), los archivos de materiales (\*.rad) y la grilla de medición (\*.pts) fueron extrapolados de forma directa de RADIANCE Desktop a DAYSIM. En el caso del archivo climático (\*.wea), al no poseer DAYSIM en su base de datos el clima regional de Mendoza, fue necesario la utilización del programa Meteororm. Éste permitió a partir de la base de datos incorporada, generar el archivo correspondiente a la región de Mendoza. A partir de los datos y archivos cargados, se genera el análisis y cálculo de métricas dinámicas de iluminación natural. Las métricas utilizadas para los fines de este trabajo, fueron: DF (Coeficiente de Luz Diurna) y UDI (iluminación natural útil). El DF expresa la relación entre la iluminancia producida por la luz natural en un punto y la iluminancia en el exterior determinada en el mismo instante y sin obstrucción. En el caso del UDI (iluminancia natural

útil) la métrica se basa en la iluminación en un punto del plano de trabajo. Como su nombre lo indica, su objetivo es establecer si la iluminación en ese plano es útil para el ocupante, basándose en cálculos de valores umbrales a alcanzar sin sobrepasarlos. Los rangos establecidos son: inferior a 100 lux, por encima de 2.000 lux y útil si se encuentra entre estos dos valores (de 100 a 2000 lux).

3.3. Modelo a escala y análisis subjetivo

El estudio fue desarrollado a partir de dos modelos a escala (1:20) de la sala de estudio. Uno, correspondiente a lo que denominaremos “cuarto de control o referencia”; y el otro, al “cuarto de testeo o evaluación”. Estos modelos autoportantes, permitían el montaje de las diferentes superficies vidriadas a evaluar de manera ágil y rápida, por medio de mecanismos de guía. La escala elegida permitió un trabajo de alto grado de iconicidad del mobiliario y los detalles de su interior. Las dimensiones finales a escala fueron de 0.25m x 0.43m x 0.17m. Para ambos modelos fueron previstas aberturas para poder visualizar el interior del mismo (fig. 5).

En la siguiente tabla (tabla 1) se detallan el vidrio y los filtros seleccionados para su estudio, con sus respectivas propiedades ópticas: transmitancia (T), reflectancia anterior (Ra) y reflectancia posterior (Rp) (fig. 4).

Tabla 1: Características de los elementos translucidos seleccionados.

Producto	Propiedades ópticas			Fabricante	Características
	T	Ra	Rp		
Vidrio CLEAR2 LO	0.91	0.082	0.082	Pilkington North America	
Filtro fxst35	0.334	0.049	0.049	3M Corporation	Filtros oscuros con una diferencia de (T) entre ambos de un 15%
Filtro fxst20	0.231	0.047	0.046		
Filtro p18ar	0.17	0.578	0.578		Filtro espejado de elevada reflectancia

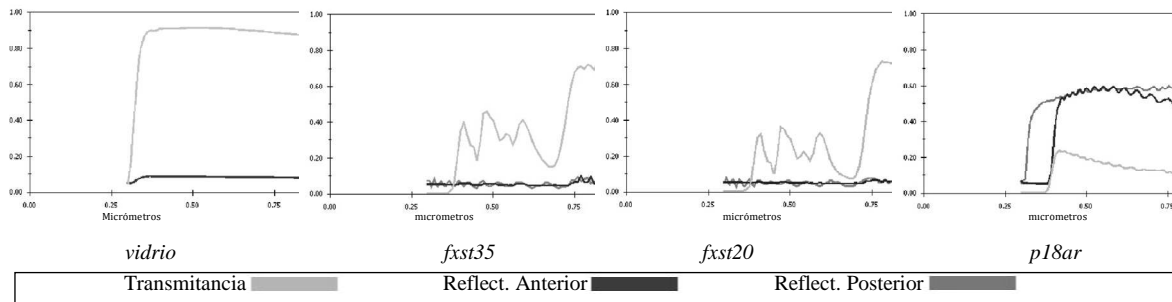


Fig. 4: curvas de transmitancia y reflectancia del vidrio y los filtros seleccionados. Optic5.

3.3.1. Procedimiento experimental

El experimento fue desarrollado a lo largo de dos sesiones en días consecutivos (condiciones climáticas similares), en el horario matutino de 10:30 a 12:30 horas, con el objetivo de mantener constantes las condiciones a lo largo de todo el experimento. El número de muestra elegido fue de 12 sujetos, a partir de criterios de selección: sujetos entre 18 y 35 años de edad (rango etéreo prevaleciente en el ambiente universitario), con visión normal o normal corregida, sin trastornos visuales.

A los modelos a escala le fueron asignado las siguientes características: “cuarto de control” superficie transparentes de características CLEAR2 LO (vidrio), “cuarto de testeo” filtros fxst35, fxst20 y p18ar. Con el fin de lograr un balance en el orden de presentación de los filtros, se aleatorizó el orden de presentación de los mismos (A/B/C - A/C/B - B/A/C - B/C/A - C/B/A - C/A/B). Esto permitiría evitar posibles errores por el intercambio de opiniones entre los sujetos.

El procedimiento de evaluación, se realizó invitando a los sujetos a observar el interior del “cuarto de control” y a

completar posteriormente un cuestionario sobre aspectos de percepción visual del espacio. Posteriormente se le pedía observar el “cuarto de testeo” (filtro A) y completar un segundo cuestionario. Se le permitía verificar sus respuestas con una nueva mirada sobre el “cuarto de control”. Una vez verificado y terminado el cuestionario 2, se le pedía al sujeto

que abandone el área de experimentación. En este momento son cambiados los filtro del “cuarto de testeo” (Filtro B). Esta metodología es repetida a lo largo de las distintos escenarios, hasta llegar al número total de filtros a evaluar (fig. 6 y 7).



Fig. 5: Modelo a escala. Fig. 6 y 7: Realización del experimento.

### 3.3.2. Cuestionario

#	Preguntas	Escala Bipolar (1-5)
1	¿Cómo percibe el espacio?	a claro-oscuro
2	¿Cómo describiría la iluminación natural en este espacio?	a borrosa - marcada b placentera - no placentera
3	¿Cómo describiría las sombras de los objetos y los alrededores de éstos?	a borrosa - marcada
4	¿Cómo percibe el color de estos objetos?	a natural - artificial
5	¿Cuál es su impresión sobre la iluminación natural en el exterior de este espacio?	a débil - fuerte b deslumbrante-no deslumbrante

Es importante mencionar que los adjetivos en la escala bipolar fueron en algunos casos positivo-negativo (2b: “placentera-no placentera”) y en otros negativos-positivos (5a: “débil-fuerte”). El cuestionario fue elaborado de esta manera con la intención de mantener la atención del sujeto. Cabe destacar también, que la escala bipolar consta de valores máximos (=5) y mínimos (=1). La repetición entre la pregunta 2a y 3a, tuvieron la función de preguntas de control, usadas para asegurar la consistencia del experimento. Las preguntas y la consistencia interna de la metodología utilizadas se basaron en estudios anteriores (Dubois y Johnsen, 2003).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Simulaciones Radiance Desktop

#### 4.1.1. Distribución de iluminancias en plano de trabajo

Como se indicó anteriormente las simulaciones en RADIANCE Desktop fueron generadas para las 11:30 horas del día 21 de junio. En la figura 10 se observan los gráficos de isolux. Los valores de iluminancia más elevados corresponden al escenario 1 (vidrio CLEAR2 LO) y van disminuyendo a medida que disminuyen las transmitancia de los filtros, presentándose los valores mínimos para el filtro p18ar. Tanto en los gráficos de isolux como en las imágenes de iluminancia (fig. 8) se observa claramente que el espacio presenta grandes variaciones en los niveles y distribuciones de iluminancia. Esto se debe a que la fachada norte del espacio, está plenamente expuesta a la radiación solar directa; mientras que la fachada sur solamente aporta radiación difusa. Sin embargo observamos que las diferencias de iluminancias se van reduciendo a medida que disminuyen las transmitancia de los elementos de control, volviéndose el espacio más homogéneo en niveles de iluminancia. Este espacio presenta similares características de heterogeneidad desde las 10:00 de la mañana hasta las

14:00 horas, hora en que el bloque saliente del edificio dispuesto al oeste de la sala de estudio obstruye la radiación solar directa sobre la fachada norte; convirtiéndose en un espacio que solo dispone de iluminación natural difusa.

Si analizamos el cuadro de valores de iluminancia, que toman los puntos de la grilla ubicados en planos de trabajo (para la fecha medida a lo largo de las horas de atención de la biblioteca) podemos observar como la situación planteada anteriormente se refleja en los valores de iluminancia obtenidos mediante la simulación (tabla 2, se indican los valores superiores a los necesarios por norma en gris). Asimismo observamos que en el primer escenario los valores de iluminancia se encuentran por encima de los requeridos para el tipo de tarea que se desempeña en este espacio en la mayoría de los puntos medidos hasta las 14:00 horas, incluso alcanzando valores muy por encima de los necesarios para las características de la tarea. A partir de las 16:00 horas la fila de puntos más alejada del norte presenta valores por debajo de los necesarios. Asimismo observamos que para el escenario del filtro fxst35 (transmitancia del 35%) solo se alcanzan valores por encima de los necesarios entre las 10:00 y las 12:00 horas, situación que se mantiene de modo similar en el escenario del filtro fxst20 (transmitancia del 20%) aunque con valores inferiores. Finalmente para el caso del filtro p18ar (transmitancia 18%), en ningún horario analizado alcanza en la totalidad de la sala valores por encima de los necesarios para el tipo de tarea realizada en el espacio. Las transmitancias tan bajas que presentan los filtros hacen que el espacio solo presente valores cercanos a los necesarios para el tipo de tarea cuando la mayor cantidad de radiación incidente es directa. Por otro lado si consideramos que la norma establece para el tipo de tarea analizado valores de iluminancia de entre 300 y 750 lux, vemos que para ninguna de las horas analizadas en cualquiera de los escenarios se presentan la totalidad de los puntos de la grilla entre los valores adecuados.

4.1.2. Relación de luminancias en plano de trabajo

Si analizamos las relaciones de luminancias medidas en los planos de trabajo podemos ver que en algunas mesadas no se respeta la relación establecida por la norma IRAM AADL J20 05 (1/3). Llegando a presentarse, en los puestos de trabajo más cercanos a la ventana norte (para el escenario sin filtros) relaciones de luminancia de 3/100 entre superficie de la tarea y el entorno cercano (fig. 8). Éstas van

gradualmente disminuyendo a medida que disminuyen las transmitancias de los filtros solares. Sin embargo en todos los escenarios las relaciones de luminancia resultan muy por encima de lo establecido por la norma, presentándose relaciones de luminancia de 7/100 (escenario fxst35), 9/100 (escenario fxst20) y 11/100 (escenario p18ar). Esta situación no se presenta en los puestos ubicados al sur, donde la radiación incidente es difusa y muy homogénea.

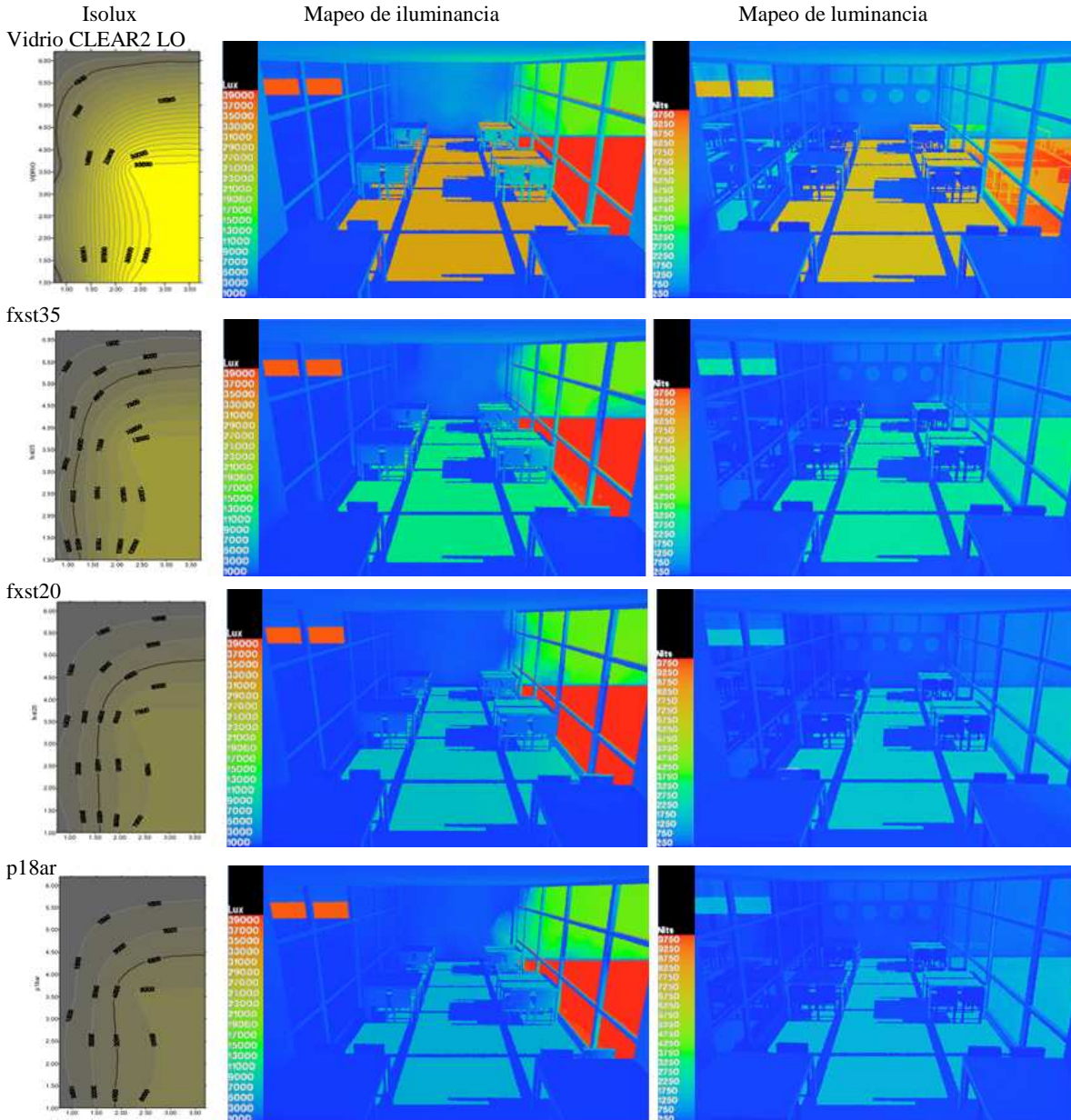


Fig. 8: curvas de isolux, mapeos de iluminancia y mapeos de luminancia.

Tabla 2: valores de iluminancia sobre puestos de trabajo, (indicados en gris los que superan los 300lux)

	Vidrio					fxst35					fxst20					p18ar				
	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
S01	27271	2252	743	342	430	6084	339	110	58	80	9895	571	188	99	129	4741	258	86	46	62
S02	27363	34616	894	362	490	6112	7838	138	68	85	9943	12624	212	106	140	4744	6061	103	53	65
S03	2105	2091	426	134	162	384	489	67	21	22	641	526	88	31	42	273	256	41	15	19
S07	25515	1295	360	318	486	5760	188	66	59	91	9326	296	102	106	162	4520	141	47	47	69
S08	25526	1739	415	360	552	5788	329	65	71	109	9402	491	111	118	183	4530	249	55	54	83
S09	1482	1646	247	126	175	231	260	36	23	31	367	389	63	37	54	165	204	28	16	24

4.2. Análisis de DAYSIM con métricas dinámicas

El análisis de métricas dinámicas se realizó para dos condiciones: vidrio CLEAR2 LO y filtro fx. De esta serie se eligió el de 35% de transmitancia "fxst35" para la simulación (tabla 3). Los resultados obtenidos sobre los puestos de trabajo (S01, S03, S04, S06, S07, S09) fueron:

Tabla 3: valores obtenidos por simulación DAYSIM.

	DF (%)	UDI (%)		
		<100	100-2000	>2000
CLEAR2 LO	S01	16.1	7	84
	S03	14.2	2	82
	S04	18.6	2	84
	S06	8.3	3	57
	S07	7.4	3	65
	S09	6.2	3	66
fxst35	S01	1.1	7	85
	S03	1.4	7	84
	S04	1.7	6	82
	S06	0.5	23	77
	S07	0.7	15	83
	S09	0.7	19	81

A partir de los datos obtenidos se obtuvieron los siguientes gráficos, (figuras 9 y 10):

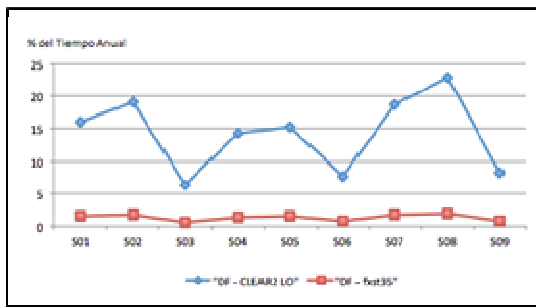


Fig. 9: porcentaje de tiempo anual en función del DF establecido por la normativa, para los distintos puntos medidos.

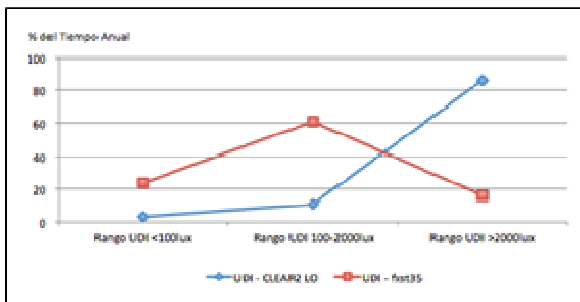


Fig. 10: porcentaje del tiempo anual en función de los rangos del parámetro UDI, para los distintos puntos medidos.

Como podemos observar (fig. 9) en el caso de CLEAR2 LO, el 100% de los sensores de iluminancia se encuentran con un DF de 2% o más (tabla 3). Sin embargo en el caso de fxst35, tan solo el 11% de los sensores de iluminancia se encuentran en esas condiciones. Esto genera que el 89% de los sensores se encuentren por debajo de la norma Norteamericana LEED-NC 2.1, ésta estipula la necesidad de al menos el 75% de los sensores ubicados en puestos de trabajo con DF de 2% o más. (US Green Building Council, 2006).

Con respecto al parámetro UDI analizado, observamos (fig. 10) claramente que en el caso de CLEAR2 LO, las condiciones de iluminancia por encima de los 2000lux concentra el mayor porcentaje (86%), aspecto que no se repite en condiciones de fxst35. En este último caso, podemos observar, que a lo largo del año, sus valores se encuentran entre los 100 y 2000 lux (rango de usabilidad) durante un 61% del tiempo (tabla 3). Este análisis permite también verificar, que de acuerdo al parámetro elegido (UDI), la situación preponderante en CLEAR2 LO, representa un indicador de potenciales malestares y deslumbramientos. Demostrando las consecuencias en la radiación visible de la ausencia de sistema de control solar.

Resulta muy importante analizar, que debido a las modificaciones del espacio y sus condiciones, el gasto energético estipulado para CLEAR2 LO es de 1.8KWh/ m<sup>2</sup>, mientras que para fxst35 es de 2.3kWh/m<sup>2</sup>. Estos resultados se relacionan de manera directa con la autonomía energética del espacio.

4.3. Modelo a escala y análisis subjetivo.

Los resultados de las encuestas fueron compilados en una base de datos bajo las valoraciones obtenidas en el cuestionario (escala bipolar). Las nomenclaturas usadas en las gráficas fueron las siguientes: CLEAR2 LO (TG), fxst35 (T35), fxst20 (T20) y el p18ar (T18E); basada en los índices de transmitancia de las superficies usadas. A continuación se presentan algunos de los datos más significativos de las encuestas realizadas.

-Pregunta 1a: ¿Cómo percibe el espacio?

Parámetro Bipolar: claro - oscuro

Los datos obtenidos se muestran claramente separados en dos grupos de valoración: uno, valoraciones positivas-moderadas (claro); y otro negativas-moderadas (oscuro). En cuanto al primer grupo (escenario con vidrio genérico), podemos observar que el 75% de los sujetos coincidieron en una percepción clara del ambiente; sin embargo en el segundo grupo (escenarios con distintos filtros) estas ponderaciones se desplazaron a valores intermedios, en porcentajes 42%, 58% y 50% correspondientes a los filtros T35, T20 y T18E respectivamente (fig. 11).

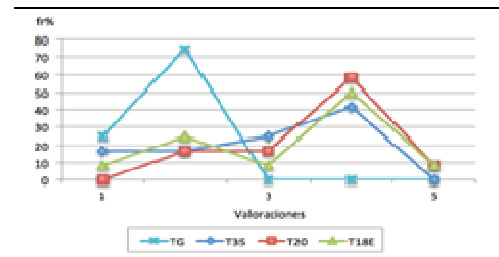


Fig. 11: frecuencias relativas porcentuales de las valoraciones obtenidas en la pregunta 1a.

-Pregunta 2a: ¿Cómo describirías la iluminación natural del espacio?

Parámetro Bipolar: borrosa - marcada

En esta pregunta, se pudo observar que en escenarios con vidrio genérico (TG), las ponderaciones obtenidas para el parámetro "marcada" (relacionado a la sombra proyectada en el ambiente) fueron del 67%. Sin embargo a media que disminuían los niveles de transmitancia (Filtro T35, T20 y

T18E, respectivamente) estos valores se fueron desplazando hacia el parámetro “borroso” (fig. 12).

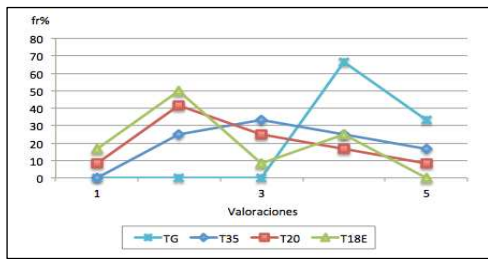


Fig. 12: frecuencias relativas porcentuales de las valoraciones obtenidas en la pregunta 2a.

-Pregunta 2b: ¿Cómo describirías la iluminación natural del espacio?

Parámetro Bipolar: placentera – no placentera

En cuanto al parámetro “placentero o no placentero” podemos observar dos grupos: uno de ponderación alta positiva, formado por TG, T35 y T20; y otro de ponderación alta negativa formado por T18E. En cuanto a los resultados observamos que el primer grupo obtuvo el 42%, 33% y 33% respectivamente, en valoraciones positivas-moderadas; sin embargo en el caso T18E presenta una notable diferencia en la percepción obteniendo un 42% de valoración negativa-moderada (fig. 13).

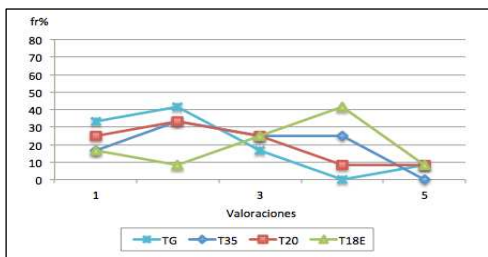


Figura 13: frecuencias relativas porcentuales de las valoraciones obtenidas en la pregunta 2b.

-Pregunta 4a: ¿Cómo percibe el color de los objetos?

Parámetro Bipolar: natural - artificial

Al igual que lo obtenido en la pregunta (1), los datos muestran claramente una separación de las valoraciones en dos grupos: valoraciones positivas altas y bajas-moderadas. En cuanto al primer grupo (escenario con vidrio genérico), podemos observar que el 58%, de los sujetos coincidieron en una percepción natural del ambiente; sin embargo en el segundo grupo (escenarios con distintos filtros) estas ponderaciones se desplazaron a valores bajos-moderados, en porcentajes del 42%, 33% y 50% correspondientes a los filtros T35, T20 y T18E respectivamente (fig. 14).

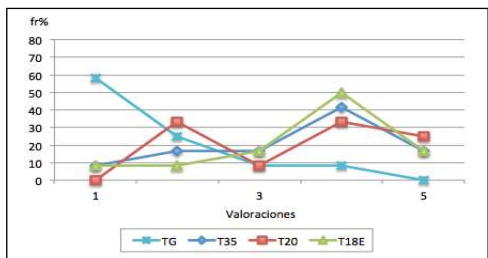


Fig. 14: frecuencias relativas porcentuales de las valoraciones obtenidas en la pregunta 4a.

-Pregunta 5a: ¿Cuál es la impresión sobre la iluminación natural en el exterior del espacio?

Parámetro Bipolar: débil – fuerte

Al igual que lo obtenido anteriormente, es este caso también existe una separación entre los escenarios con TG y los escenarios con T35, T20 y T18E. En el caso de TG podemos hablar de una valoración opuesta al grupo de filtros; es decir, con TG el espacio exterior al recinto es caracterizado por el parámetro fuerte (50%), mientras que T35, T20 y T18E esta valoración es opuesta débil-moderada (50%, 42% y 33% respectivamente) (fig. 15).

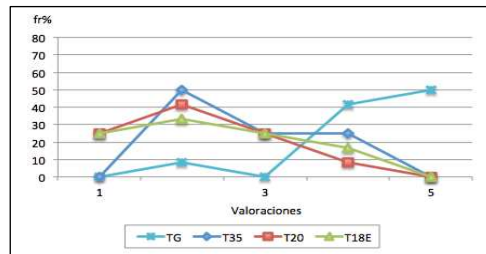


Fig. 15: frecuencias relativas porcentuales de las valoraciones obtenidas en la pregunta 5a.

-Pregunta 5b: ¿Cuál es la impresión sobre la iluminación natural en el exterior del espacio?

Parámetro Bipolar: deslumbrante – no deslumbrante

Los datos obtenidos muestran como las valoraciones de TG si bien se mantienen dispersas, posee una leve tendencia en valoraciones positivas-moderadas y positivas-altas, aglutinando aproximadamente el 50% de la muestra. Asimismo, podemos mencionar que en los casos de T35, T20 y T18E, presentan una tendencia más marcada y revelan claramente una valoración del parámetro “no deslumbrante” moderada en el caso de T35 y alta en T20 y T18E (fig. 16).

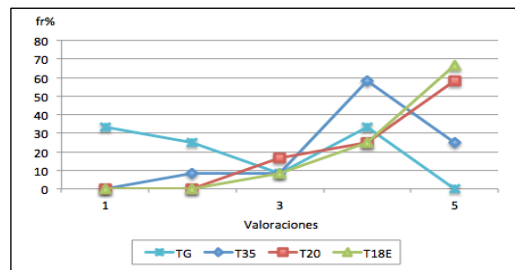


Fig. 16: frecuencias relativas porcentuales de las valoraciones obtenidas en la pregunta 5b.

#### 4.4. Interrelación de resultados.

Si analizamos conjuntamente los valores de iluminancia que arroja el modelo virtual y las respuestas predominantes de la pregunta 1a, vemos que la disminución de los valores de iluminancia generada por la acción de los filtros es ampliamente percibida por los sujetos encuestados. Asimismo al analizar los resultados de iluminancia obtenidos, vemos que los filtros aportan una mayor homogeneidad al ambiente, esta homogeneidad es claramente percibida por los usuarios como lo indica la figura 16, en la cual los sujetos indican que perciben las sombras más borrosas para los escenarios con filtro. Sin embargo como se mencionó anteriormente, los filtros disminuyen de manera significativa los valores de iluminancia, quedando por encima de los valores necesarios solamente aquellas zonas expuestas a la componente directa de la radiación solar. Esto implica, para las estaciones en las cuales la altitud solar es mayor que la de invierno (menor



penetración de la componente directa de la radiación solar en el interior del espacio) una disminución radical de las horas del día en la cual los valores de iluminancia están por encima de los necesarios para este tipo de actividad.

La disminución en los valores de iluminancia obtenidos mediante el simulador Radiance Desktop para aquellos escenarios con filtros correlaciona con el aumento en el consumo de energía, que estipula la simulación desarrollada con DAYSIM. Para el caso del vidrio CLEAR2 LO observamos que un mayor porcentaje de los datos está concentrado en un UDI mayor a 2000lux, sin embargo para el filtro fxst35 la mayor concentración se da para UDI de 100-2000lux. Esto implica en el caso del vidrio, que los valores se concentran fuera del rango "usable" (UDI 100-2000) no porque necesita de iluminación artificial complementaria, sino porque requiere el control de la luz solar excedente. En el caso del fxst35 si bien los valores obtenidos se concentran más en el rango "usable", aparecen en relación al escenario con vidrio, una importante cantidad de valores por debajo de los 100lux, tornándose el espacio más dependiente de energía eléctrica para iluminación (ver tabla 2).

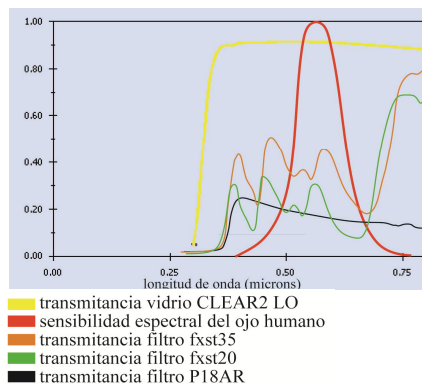


Fig. 17: curvas de transmitancias de los elementos transparentes y curva de sensibilidad espectral del ojo humano.

Por otro lado es interesante observar la correlación que existe entre las curvas de transmitancia de los distintos elementos empleados, la percepción de los sujetos encuestados y la curva de sensibilidad espectral del ojo humano (fig. 17). Vemos que el vidrio es el elemento traslúcido que mejor reproduce la sensibilidad espectral del ojo humano, mientras que los filtros absorben o reflejan una gran parte de la radiación correspondiente a la zona de sensibilidad espectral humana. Modificando la percepción de los colores de los objetos y el entorno. Esto se ratifica cuando analizamos el gráfico correspondiente a los resultados obtenidos para la pregunta 4a (fig. 14) del cuestionario de percepción, en la cual se consulta sobre como se percibe el color del espacio y sus elementos. El 58% de los sujetos coinciden en que el escenario con vidrio CLEAR2 LO genera una percepción natural de los objetos y el ambiente, sin embargo para los escenarios con filtros existe una marcada tendencia hacia una percepción de color artificial del ambiente. Esto también se vincula con los resultados que arroja el análisis de la pregunta 5a (fig.15) y 5b (fig. 16) en la cual se indaga sobre la percepción del ambiente exterior al espacio, percibido desde el interior. Claramente hay una modificación en la percepción de la iluminación en el exterior causada por la modificación que generan los filtros en la percepción visual, al absorber o

reflejar una gran proporción de radiación a la que es sensible el ojo humano. Por lo que para los escenarios con filtro la iluminación en el exterior se percibe como menos deslumbrante y más débil.

Sin embargo cuando nos remitimos a los resultados de la pregunta 2d vemos que hay una percepción favorable de todos los escenarios, excepto el de filtro p18ar, que es el de menor transmitancia. Esto, posiblemente se debe a una falta de sensibilidad en la diferenciación de lo percibido por parte de los sujetos encuestados, debido a que el experimento no fue desarrollado para distintas horas del día y estaciones del año, sino solamente para la fecha y el horario en el cual el acceso de la radiación solar es máximo. Por lo que se programa a futuro seguir con estudios dinámicos de percepción, que contemplen además periodos más prolongados de adecuación del sistema visual del encuestado y a su vez sean de carácter sostenido en el tiempo.

## 5. CONCLUSIONES

Lo analizado anteriormente nos lleva a destacar dos aspectos fundamentales a tener en cuenta al momento de elegir como sistema de control solar el filtro solar de baja transmitancia. En primer lugar desde la óptica del consumo energético, podemos concluir, que si bien los filtros solares disminuyen las diferencias de iluminancias y luminancias a medida que disminuyen las transmitancias de los elementos de control (volviéndose el espacio más homogéneo, con menos contraste) del mismo modo disminuyen significativamente el ingreso de radiación solar. Esto genera espacios más dependientes de fuentes artificiales de energía, disminuyendo su autonomía. Siendo que existe una disponibilidad de radiación solar tan importante en la región, es injustificable el no emplear elementos de control solar que redirijan la radiación evitando situaciones de malestar visual y generando elevados ahorros de consumo energético. Resulta fundamental concienciar a los profesionales proyectistas de la importancia del uso de la iluminación natural como recurso disponible para el adecuado acondicionamiento lumínico en espacios interiores y su consecuente ahorro energético.

En segundo lugar, considerar que el uso de filtros provoca en los usuarios de espacios con este tipo de protección solar, como se indicó en la introducción, incertidumbre sobre las condiciones del clima exterior y desorientación temporal (hora del día). Esto se debe a que los filtros absorben o reflejan gran parte de la radiación incidente por lo que modifican la respuesta espectral de la radiación solar y no reproducen fielmente la dinámica del sol, como lo hacen los vidrios fotocromáticos, por ejemplo. Es por esto que los proyectistas deben hacer un esfuerzo por diseñar elementos de control solar que respeten la sensibilidad espectral del ojo humano y contemplen los efectos no visuales de la luz y de la iluminación, considerando tanto los aspectos subjetivos como objetivos para la adecuación del entorno; no solo referidos a las tareas visuales, sino también a las características psicofisiológicas del usuario.

El presente trabajo también plantea la necesidad de una mirada crítica de las normativas vigente a nivel nacional, referidas a las características de la Iluminación Natural y Artificial. Cabe mencionar que las métricas actuales (IRAM AADL J) se basan en parámetros de *iluminancia*,

distribución y contraste de luminancia; cumpliendo con las normas generales de “buena iluminación” (IRAM- AADL J 2002 y 2005). Estos parámetros corresponden a las condiciones de iluminación de carácter artificial, dejando como indicador principal al coeficiente de luz diurna (CLD o DF), como índice representativo de la luz natural. Este índice propuesto por las normas, se encuentra determinado para condiciones de cielo nublado, aspecto que en general en el territorio argentino no se da como cielo típico; y en particular en regiones como las de Cuyo (Mendoza, San Juan, San Luis y La Rioja. Argentina), no es representativo, ya que en estas provincias el 85% de los días del año presentan cielo claro con sol. Por lo que el desafío principal para ajustar la normativa será la verificación de los nuevos índices en situaciones regionales y así incorporen la evaluación de la iluminación dinámica con base climática, como el *factor uso de los espacios*.

El uso y análisis de métricas dinámicas, claramente ofrecen un campo más representativo y sensible de las condiciones lumínicas de un espacio iluminado con luz natural. Esto se debe a un análisis a lo largo del “tiempo” con específicas condiciones climáticas. Como podemos observar en los casos analizados con DAYSIM, si siguiéramos las condiciones de DF para determinar la usabilidad o no de un espacio, este estaría bajo norma (LEED-NC 2.1). Sin embargo al momento de cruzar estos datos con el parámetros dinámicos UDI, las cantidades de lux exceden los rangos de usabilidad establecidos por éste (valores entre los 100 y 2000 lux); prediciendo falta de confort. Asimismo, en el caso de fxst35, el ejemplo anterior se invierte, dado que el DF se encuentra fuera de norma, mientras el UDI no (69% en el rango de usabilidad -100 a 2000lx-). Cabe mencionar que para futuros análisis, es necesario empezar a contemplar los parámetros dinámicos en conjunto, lo cual permitiría por ejemplo en el caso del UDI, llegar a acotar los rangos con más precisión a los requeridos por el espacio; por ejemplo con el valor DA (Daylight Autonomy); ya que hace referencia al porcentaje de horas anuales en los que un punto en el espacio está por encima de lo establecido.

## REFERENCIAS

- Anon (2000). *Lighting of Indoor Work Places*. N S 0081/E. CIE Publication Vienna, Austria.
- Betman, E. (2001) Eficacia luminosa en Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **5**, 8.19-8.24. (<ftp://ftp.cricyt.edu.ar/pub/lahv/asades/2001/ar17-08.pdf>)
- Boyce P., Hunter C. y Howlett O. (2003). The Benefits of Daylight through Windows. New York: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. (<http://www.lrc.rpi.edu/programs/daylighting/pdf/DaylightBenefits.pdf>).
- Boyce, P. (2006). Education: the key to the future of lighting practice. *Lighting Res. Technol.* **38**, 4, 283-294.
- Bülöw-Hübe H., (2008). Daylight in glazed office buildings. Division of Energy and Building Design Department of Architecture and Built Environment. Lund University. Faculty of Engineering. ([http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi\\_byggnadsdesign/images/Publikationer/Report\\_EBD\\_R\\_08\\_17\\_dagsljus.pdf](http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Report_EBD_R_08_17_dagsljus.pdf))
- Chauvel P. y Dogniaux R. (1982). Glare from windows: Current views of the problem. *Lighting Research & Technology* **14**, 31-46.
- Dubois M. C. y Johnsen K. (2003). Impact of coated windows on visual perception. A pilot study in scale models. BYOGBYG Resultater OXX Statens Byggeforskningsinstitut. pp. 1-39. (<http://www.grap.arc.ulaval.ca/attaches/Dubois/IGS.pdf>)
- Edwards L. y Torcellini P. (2002). A Literature Review of the effects of Natural Light on building occupants. Technical Report. NREL/tp-550-30769. (<http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/30769.pdf>)
- Fontoynt M. (1999). *Daylight performance of buildings*. ENTPE, Lyon.
- Galasius A. y Veitch J., (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: A literature review. *Energy and Buildings* **38**, 728-742.
- Japee S. y Schiler M. (1999). A method of post occupancy glare analysis for building energy performance analysis. Proceedings of the American Solar Energy Conference, Minneapolis, MN. ([http://arch.usc.edu/content/pages/cm/uploadedmedia/as\\_es\\_1995\\_-\\_post\\_occupancy\\_glare1242155561934.pdf](http://arch.usc.edu/content/pages/cm/uploadedmedia/as_es_1995_-_post_occupancy_glare1242155561934.pdf))
- Jarvis D. y Donn M. (1997). Comparison of Computer and Model Simulations of a Daylight Interior with Reality: Proceedings of Fifth International IBPSA Conference / Building Simulation 97, Sept. 8-10, Prag (Czech Republic). Vol III-9. ([http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1997/BS97\\_P086.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1997/BS97_P086.pdf))
- Pattini A., Rodríguez R., Lasagno C., Villalba A., Córca L., Ferrón L., del Rosso R. (2009). Evaluación de deslumbramiento en edificios con iluminación natural en climas soleados. El caso de una biblioteca con techo vidriado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **13**, 05.169-05.177.
- Pattini A., Villalba A., Córca L., Ferrón L., del Rosso R., (2009). Elementos de control de luz solar directa en fachadas vidriadas de edificios no residenciales de ciudad oasis. Rediseño para aulas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **13**, 05.179- 05.186.
- Reinhart C. F., (2006). Tutorial on the Use of DAYSIM Simulations for Sustainable Design. Ottawa: Institute for Research in Construction, National Research Council Canada. (<http://daysim.com/pub/Daysim3.0Tutorial.pdf>)
- Reinhart C.F., Mardaljevic J. and Rogers Z., (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos* **3**, 1, 1-25. (<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc48669/nrcc48669.pdf>)
- Schiler, M., (2000). Towards a definition of glare: Can qualitative issues be quantified? 2° EAAE, ARCC. Paris.
- Tonello G., (1998). Efectos no visuales de la luz, una puesta al día. *Revista Luminotecnia* n° 56.
- US Green Building Council (2006). LEED-NC (Leadership in Energy and Environmental Design) Version 2.2. from [www.usgbc.org/LEED/](http://www.usgbc.org/LEED/).
- Ward L. G. y Shakespeare R., (1998). Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Webb A. R., (2006). Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. *Energy and Buildings* **38**: 721-727.