

HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE ÁREAS VIDRIADAS ÓPTIMAS PARA EL DISEÑO SOLAR PASIVO DE EDIFICIOS ESCOLARES EN EL CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO DE LA REGIÓN N.E.A.

M.L. Boutet¹ y A.L. Hernández²

1. Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Territorial y del Hábitat Humano (IIDTHH) – CONICET - Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Av. Las Heras 727, CP 3500, Resistencia, Chaco, Argentina. Tel: (54) 0362-4425573 - Telefax: (54) 0362-4420088 / e-mail: arq.mlboutet@gmail.com

2. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) – CONICET - Universidad Nacional de Salta (UNSa.), Av. Bolivia N° 5150, CP 4400, Salta Capital, Argentina. Tel. (54) 0387-4255424 – Telefax: (54) 0387-4255489 / e-mail: alejoher65@gmail.com

Recibido: 1-11-20; Aceptado: 20-12-20; Publicado en línea : 17-02-21.

RESUMEN.- La determinación de criterios para dimensionar áreas vidriadas adecuadas en los edificios escolares es fundamental, a fin de aprovechar la energía solar pasiva para iluminación sin producir sobrecalentamiento, en un clima cálido – húmedo de latitud media. Se presenta una metodología de estimación del Factor de Vidriado (Fv) por regresión lineal multivariada y sus resultados, con base en una Propuesta Genérica verificada para prototipos escolares representativos de planta abierta y compacta, de Resistencia, Chaco. Con la metodología de estimación del Fv, que relaciona las variables más importantes en juego, Área de vidrio (Av), absorptancia solar (α) y Área de envolvente total (A_{envolvente}), se pueden obtener los valores óptimos de las áreas vidriadas por orientación, con la certeza de que conducirán al confort térmico y lumínico, porque es el resultado del análisis estadístico de simulaciones validadas mediante el monitoreo de variables ambientales externas e internas en condiciones reales de uso. Su aplicación en dos ejemplos hipotéticos permitió verificar distintas relaciones de superficies óptimas de vidrio por m² de fachada asoleada, según las variables analizadas, ampliando lo establecido en la normativa vigente. Este procedimiento iterativo mediante correlaciones se desarrolló utilizando hojas de cálculo de Excel como herramienta de diseño para ser transferida.

Palabras claves: envolvente edilicia; iluminación natural; confort térmico

ESTIMATION TOOL OF OPTIMAL GLAZED AREAS FOR PASSIVE SOLAR DESIGN OF SCHOOL BUILDINGS IN THE HOT-HUMID CLIMATE OF THE N.E.A. REGION

ABSTRACT.- Determining criteria for sizing suitable glazed areas in school buildings is substantial to take advantage of passive solar energy for lighting without producing overheating, in a hot-humid mid-latitude climate. A methodology of the Glazing Factor (gF) estimation by multivariate linear regression and its results are presented, based in a Generic Proposal verified for representative open and compact floor plan school prototypes of Resistencia, Chaco. With the gF estimation methodology, which relates the most important variables in play, glass area (gA), solar absorptance (α) and total envelope area (envelopeA), the optimal values of glazed areas by orientation can be obtained, with the certainty that they will lead to thermal and lighting comfort because it is the result of the statistical analysis of simulations validated by external and internal ambient variables monitoring in real conditions of use. Its application in two hypothetical examples allowed to verify different relationships of optimal glass surfaces per m² of sunny facade, according to the variables analyzed, expanding what is established in current regulations. This iterative procedure through correlations was developed using Excel spreadsheets as a design tool to be transferred.

Keywords: building envelope; natural lighting; thermal comfort

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones para encontrar la configuración óptima de las ventanas y su impacto en el rendimiento energético de los edificios han sido extensamente desarrolladas en el ámbito internacional. Se reconoce que una relación ventana-muro óptima puede producir ahorros de energía significativos ante

la demanda de calefacción, refrigeración e iluminación en los edificios (Mangkuto et al., 2016). De hecho, existen muchos estudios sobre la optimización de ventanas multiobjetivo para ubicaciones de latitud media (entre 23,5°N y 23,5°S), principalmente sobre edificios de oficinas. Sin embargo, la tipología de edificios escolares merece una atención especial ya que presenta una concentración relativamente alta de

cargas de origen humano en una misma zona térmica (40 niños), que utilizan el aula durante un tiempo prolongado durante el día de clases y en actividades extracurriculares (Capeluto, 2019). Estas condiciones se reflejan en la demanda de enfriamiento relativamente alta en climas cálidos y húmedos donde la luz y el calor que ingresan a través de las áreas vidriadas se convierten en factores antagónicos (Boutet et al., 2020).

En el trabajo de Ochoa et al. (2012), se estudiaron variaciones discretas de la relación ventana-muro para demostrar cómo estos criterios afectan la solución espacial, concluyendo que la mayoría de las expectativas del proyecto se pueden cumplir dentro de una variedad de tamaños. Sin embargo, las ventanas sin protección apenas cumplen con los criterios de aceptación y necesitan dispositivos de control adicionales. Lartigue et al. (2014) así como Futrell et al. (2015), buscaron las variables óptimas que conduzcan a la minimización de la carga energética (refrigeración/ calefacción) y a la maximización de la duración de la luz diurna interior. Las variables a optimizar fueron la relación ventana-muro y el tipo de ventana caracterizado por sus propiedades visuales y térmicas (transmitancia visual y solar y valor U). Las variables tienen efectos antagónicos sobre dichos objetivos: la relación ventana-muro y el tipo de ventana pueden tener efectos opuestos al aumentar la ganancia solar y la duración de la luz del día durante el invierno, lo que sería beneficioso, pero podría provocar sobrecalentamiento durante el verano. Dependiendo de la orientación de las ventanas, los objetivos térmicos y de iluminación natural pueden estar en fuerte conflicto. Por su parte, Abanda et al. (2016) analizaron el consumo energético correspondiente a diferentes orientaciones, entre la mejor (+ 180 °) y la peor (+ 45 °), y encontraron que un edificio con una buena orientación podría ahorrar una cantidad considerable de energía en su ciclo de vida completo.

Es evidente la necesidad de un enfoque integral que incluya la demanda de energía de calefacción, refrigeración e iluminación artificial, para reducir la demanda total de energía del edificio, y que la optimización de la configuración de la fachada ya no se vuelve sencilla porque a menudo se revelan relaciones no lineales (Goia et al., 2013). A pesar de ello, el rendimiento energético de los edificios y los análisis de iluminación natural se desacoplan y rara vez se estudian simultáneamente.

Chiesa et al. (2019), proporcionan un análisis completo de antecedentes sobre la relación ventana-muro y las necesidades energéticas. Los análisis realizados por dichos autores, considerando como principal parámetro de diseño la relación ventana-muro, tienen un valor metodológico al presentar un enfoque innovador para definir las configuraciones óptimas de las envolventes de los edificios y las características de las ventanas con respecto a la minimización de las necesidades energéticas anuales, incluidos los efectos potenciales de la variación aleatoria en la ocupación. Este enfoque permite respaldar las opciones de diseño desde la fase preliminar mientras considera los fenómenos de perturbación que pueden ocurrir en situaciones reales.

Los efectos potenciales de la variación aleatoria en la ocupación son, de hecho, un factor determinante, especialmente en edificios escolares con condiciones de uso intensivas, cuya especificación es difícil porque el comportamiento de los ocupantes no es una cuestión de

horarios fijos, sino que involucra la iniciativa humana (Boutet, 2017). Por lo tanto, la influencia de los ocupantes en el consumo de energía puede dar lugar a grandes diferencias entre el rendimiento energético real y el previsto en los edificios.

En Argentina, existen diferentes experiencias exitosas de ejecución de prototipos demostrativos de edificios escolares o institucionales bioclimáticos, que priorizan el acondicionamiento natural para el logro de las condiciones de confort higrotérmico y la reducción del consumo eléctrico, sobre todo a partir del dimensionamiento de sus áreas vidriadas. Filippín et al. (2020) ejecutaron y evaluaron mediante monitoreos post-ocupación, el edificio de la Agencia de Extensión Rural de INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), situado en Victorica, en el noroeste de la provincia de La Pampa, situación de borde entre la zona bioambiental IIIa y IVb de máxima irradiancia (IRAM 11603:2011). Su diseño contempló estrategias de solarización (ganancia solar directa), combinadas con otras premisas de diseño solar pasivo (conservación, disipación y protección solar), considerando además, el comportamiento del usuario como un aspecto decisivo. Con un área colectora solar (área de vidrio efectivo) de 7 % del área útil del edificio y mediante la orientación de los espacios según su uso (permanente y no-permanente) para maximizar el aprovechamiento de la radiación solar minimizando la zonificación térmica entre áreas con y sin ganancias solares directas, se logró alcanzar el confort térmico con un importante ahorro energético tanto en períodos fríos como en períodos cálidos, registrando valores cercanos a los estándares internacionales para edificios de bajo consumo. Este 7% significó una reducción del 40% respecto a los primeros edificios bioclimáticos construidos en la región (Filippín, and Beascochea, 2007), en los que se había verificado sobrecalentamiento en verano y estaciones intermedias.

Además se han realizado evaluaciones y diagnósticos socio-ambientales para la formulación de futuras propuestas de rehabilitación. Re y Bianchi (2020) presentaron una metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética de edificios escolares existentes en el Área Metropolitana de San Juan (Zona bioambiental IIa Cálida-seca según IRAM 11603:2011) para seis casos pertenecientes al Programa Nacional 700 Escuelas. Particularmente, la categoría *Confort y Habitabilidad* evidencia un déficit significativo en todos los casos, con bajos niveles de confort térmico, acústico y lumínico. Desde el punto de vista térmico las escuelas presentan serios problemas de infiltración de aire, en cuanto al confort lumínico, se registran, en algunas aulas y en determinados momentos del día, niveles de luminancia superiores a 500 lux producto del ingreso solar directo sobre los planos de lectura al no disponer de ningún dispositivo de protección o distribución de la luz natural.

De la misma manera, a partir de la sistematización y análisis de las características de una muestra representativa (40%) del parque de edificaciones escolares del sector de educación primaria de la provincia de Tucumán, Zona bioambiental IIa Cálida-seca (IRAM 11603:2011), Ledesma et al. (2016) observaron que la relación entre el consumo de energía y las condiciones de iluminación interior responde a la resolución morfológica de las ventanas y sus protecciones. Los sistemas de protección solar, imprescindibles para el clima de esta

localidad, no están incorporados en un gran número de colegios y en los que sí, no se resuelven correctamente.

En el trabajo de Boutet (2017), se abordó la problemática de la Región Nordeste Argentina (N.E.A.), específicamente en Resistencia, ciudad de la provincia del Chaco que pertenece a la Zona bioambiental Ib de clima Muy cálido y húmedo (IRAM 11603:2011) con altos niveles de irradiación solar, donde existe una interacción incompatible o antagónica entre la luz natural que ingresa a través de las superficies vidriadas de los edificios y la temperatura interior de los ambientes. La luz natural va acompañada de ganancias de calor instantáneas, produciendo sobrecalentamiento y deslumbramiento molesto, que conduce a bloquear las áreas vidriadas con cortinas u otros dispositivos y al uso de luz artificial en forma permanente, aumentando el consumo de energía eléctrica tanto para refrigeración como para iluminación. Sumado a ello, la trama urbana de Resistencia se encuentra a media orientación (45° en relación con el norte verdadero), por lo que las ventanas colectan radiación solar en todas las estaciones del año.

Al respecto, la Normativa de infraestructura escolar, basada en las Normas IRAM, establece que si la iluminación de un local está dada fundamentalmente sobre la base de la luz diurna, es conveniente que, desde el punto de vista lumínico, la relación máxima entre área vidriada (considerada a partir de 1 m de altura) y área de piso no sea excesiva, recomendándose como máximo: 18 % en locales con orientación al Este u Oeste y 25 % en locales con orientación al Norte o Sur (MCEN, 1996). Por otra parte, el Reglamento de Construcciones de la ciudad de Resistencia (1990) establece un 10 % de área vidriada por área de piso para iluminación y ventilación como mínimo. Por consiguiente, las normativas mencionadas no contemplan la situación a media orientación y además limitan los tamaños de aventanamientos definiendo la relación de áreas vidriadas por área de piso, mientras que la geometría demuestra que, a igual

área de piso, un aula de base rectangular tiene más área de paredes expuestas al sol que uno de base cuadrangular de la misma altura. Esto puede originar mayores flujos de calor a través de los muros asoleados en el primer caso y, por consiguiente, dar lugar a sobrecalentamientos en un clima “muy cálido – húmedo”, incluso durante el otoño, estación delicada considerando que las temperaturas exteriores aún son elevadas por efecto de la inercia de la tierra y que existe buena disponibilidad de irradiación solar. En consecuencia, dichos valores de referencia no serían válidos para las particularidades del clima y emplazamiento de la ciudad de Resistencia.

A partir del análisis estadístico de los resultados de 63 auditorías termo-energéticas ejecutadas durante un año completo (abril de 2012 a marzo de 2013) en ocho prototipos de los niveles inicial, primario, secundario y terciario (figura 1), se determinó que los edificios escolares de Resistencia no satisfacen los parámetros de habitabilidad higrotérmica y lumínica para el desarrollo de la labor educativa. El entrecruzamiento de datos objetivos resultado de las mediciones de variables internas y externas con los datos subjetivos recabados a partir de encuestas realizadas a los usuarios (alumnos, docentes, preceptores y autoridades) y registro de las condiciones de operación de los establecimientos, permitió determinar casos particulares de sobrecalentamiento con temperaturas que exceden el límite superior de confort térmico regional en todos los meses del año auditado, excepto en julio. Estos casos, no sólo son resultado de ganancias solares directas sino también de ganancias indirectas a través de la envolvente constructiva y de la admisión de grandes renovaciones de aire en horarios no convenientes por parte de los usuarios. Sólo algunos casos están relacionados con molestias visuales por exceso de iluminancia. Los demás registraron tasas más altas de disconfort visual debido a la falta de aprovechamiento de la luz natural.



Fig. 1: Edificios escolares auditados en la ciudad de Resistencia, Chaco.

De esta manera, la investigación se orientó a la determinación de una metodología para dimensionar áreas adecuadas de vidriado por área de piso y área de fachada expuesta de las aulas, según su orientación, geometría, color de terminación de superficies exteriores y tecnología constructiva, entre otras variables simples de diseño pasivo, que condujo al esbozo de una propuesta genérica mediante simulación dinámica, con las condiciones de habitabilidad higrotérmica y lumínica necesarias y la consiguiente reducción de las cargas de climatización e iluminación. Aplicando dicha propuesta a los casos de estudio, se determinó la herramienta de Estimación del Factor de Vidriado (Fv) mediante regresión lineal multivariada para el cálculo de áreas vidriadas óptimas.

Partiendo de dichos antecedentes, son objetivos del presente trabajo:

- Presentar la metodología de Estimación del Factor de Vidriado (Fv) mediante regresión lineal multivariada, como producto final de la investigación.
- Aplicar las correlaciones obtenidas para la determinación de áreas vidriadas óptimas en ejemplos prototípicos sencillos, para distintos valores de absorptancia solar.
- Verificar los fundamentos de la investigación a partir de los resultados obtenidos.

2. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE VIDRIADO (Fv)

Tal como se introdujo previamente, para la definición de la herramienta de estimación del Fv por regresión lineal multivariada, se ejecutó un procedimiento metodológico minucioso y de cierta complejidad, en distintas fases o etapas que se sintetizan en la figura 2.

El equipo de medición para efectuar las auditorías consistió en una Micro-estación meteorológica H21-002 CONSET (USA) y 20 data loggers HOBO (USA) T °C / % RH / LUX MOD U12-012. Tanto la metodología de monitoreo como la descripción completa del equipo de medición pueden hallarse en Boutet et al. (2013 y 2014), mientras que en el trabajo de

Boutet et al. (2020), se describe la metodología de análisis comparativo y diagnóstico integral de variables ambientales interiores y exteriores medidas simultáneamente, desarrollada para la interpretación de las 63 auditorías. Se partió de la definición de un nuevo indicador dimensional y termofísico por orientación denominado Factor de vidriado (Fv), así como de índices higrotérmicos combinados e índices lumínicos de acuerdo a los rangos de confort regional y a la variabilidad climática que caracterizó el año auditado. Dicho procedimiento metodológico es significativo porque los indicadores e índices son totalmente nuevos y permitieron comparar los comportamientos generales de los edificios monitoreados considerando múltiples variables simultáneamente para llegar a un diagnóstico integral.

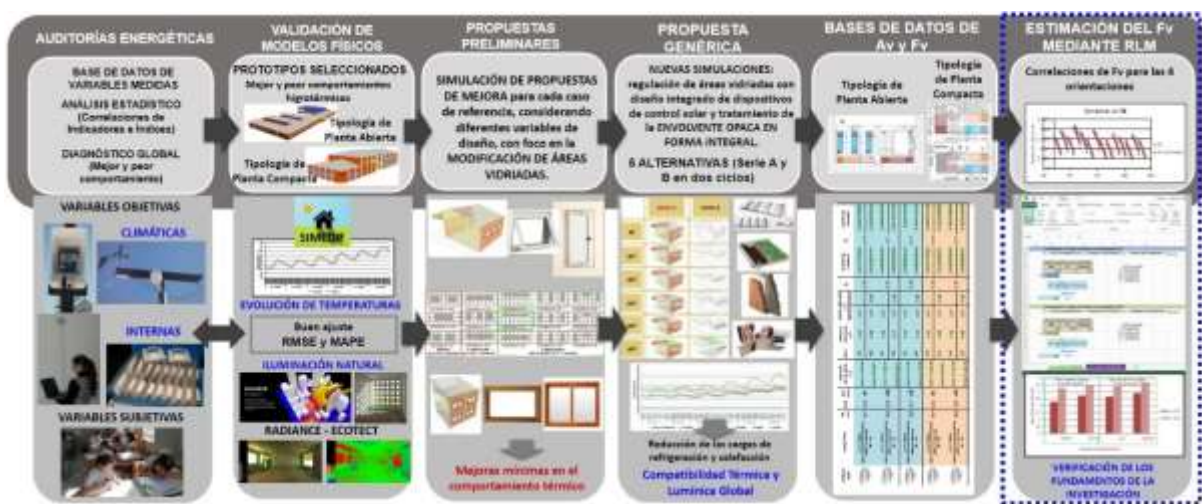


Fig. 2: Pasos metodológicos para definir la metodología de Estimación del Fv mediante Regresión lineal Multivariada.

El Factor de vidriado (Fv) fue el parámetro original que permitió relacionar las variables más significativas de proyecto por orientación: absortancia solar promedio ponderada ($\bar{\alpha}$) de las superficies opacas exteriores según su color de terminación, es decir, la fracción de radiación solar incidente que es absorbida por los materiales; el área vidriada de puertas y ventanas (A_v) y área total de envolvente opaca y vidriada ($A_{envolvente}$). [Eq. (1)]

$$F_v = \frac{\bar{\alpha} \cdot A_v}{A_{exp}} \quad (1)$$

donde:

Fv = Factor de Vidriado de cada local por orientación

$\bar{\alpha}$: absortancia solar promedio ponderada de todas las superficies exteriores.

A_v : área total de vidrio en ventanas y puertas expuestas al exterior.

A_{exp} : área de fachadas y techos expuestos al exterior descontando A_v .

Entonces $A_{exp} = A_{envolvente} - A_v$

De este factor que se calculó para cada orientación cardinal y color de fachadas en que se encuentran las ventanas y puertas vidriadas, se despeja la ecuación para el cálculo del área vidriada óptima, en la que se verifica una relación inversamente proporcional con la absortancia solar [Eq. (2)]. Cuanto mayor sea el valor de la absortancia (superficie más oscura), menor será el área de vidrio admisible.

$$A_v = \left(\frac{F_v}{F_v + \bar{\alpha}} \right) A_{envolvente} \quad (2)$$

A partir de este nuevo factor y su determinación en propuestas optimizadas obtenidas mediante modelos de simulación dinámica calibrados con las mediciones, fue posible trazar dos líneas de acción: La primera, el esbozo de una “Base de Datos de Áreas Vidriadas y de Factores de Vidriado” para dos prototipos de referencia, de planta abierta (EP 1058, de mejor comportamiento) y de planta compacta (EP 373, de peor comportamiento), incluyendo recomendaciones referidas al uso de dispositivos de protección solar y climatización auxiliar en los períodos térmicamente más desfavorables. Sin embargo, éstas resultarían limitadas si se quisiera evaluar otras tipologías distintas a las de referencia, por lo que se prosiguió con la estimación del “Factor de Vidriado por Regresión Lineal Multivariada” como la segunda línea de acción que se presenta en este trabajo. Se detalla a continuación el procedimiento de cálculo implementado, partiendo de la descripción de la Propuesta Genérica optimizada aplicada a los modelos utilizados como datos de entrada.

2.1. Propuesta Genérica Optimizada.




Con los edificios auditados durante un año, se identificaron patrones de comportamiento de todos los niveles educativos, lo que posibilitó validar y calibrar, con un muy buen grado de ajuste, los modelos obtenidos mediante simulación dinámica en condiciones reales de uso, definiendo con precisión las condiciones operativas de cada local, e ingresando los datos meteorológicos medidos, para el testeo de distintas alternativas de optimización termo-lumínica. Se utilizó el programa Simedif, desarrollado en el INENCO y

ampliamente validado, para la evaluación de temperaturas y estimación de las cargas de refrigeración y calefacción; y el programa Ecotect de Autodesk como apoyo para evaluación de radiación solar e iluminación natural mediante su interfaz Radiance.

Luego del testeado de múltiples propuestas de mejora, verificadas para las distintas estaciones del año, se definió una Propuesta Genérica con cinco alternativas y en dos series (terminaciones de colores claros y oscuros), entre las cuales se seleccionó la denominada “pg4”, como la más óptima desde el punto de vista técnico-económico y de su comportamiento termo-lumínico, para ser aplicada a los casos de estudio. Los nuevos valores de A_v , $\bar{\alpha}$ y $A_{\text{envolvente}}$ obtenidos, se utilizaron como datos de entrada de la herramienta de estimación del Fv.

La Propuesta Genérica implicó la regulación de las áreas vidriadas y el diseño integrado de sus dispositivos de protección solar en diferentes configuraciones geométricas apropiadas para media orientación, como así también el tratamiento de la envolvente opaca encuadrada en las normativas de habitabilidad vigentes en el país, en forma integral. Se propusieron soluciones de inercia térmica media de uso conocido en el Nordeste argentino (Tabla 1) que verifican los valores medios del coeficiente global de pérdidas (U) recomendados por las Normas IRAM para verano (situación más desfavorable), así como las recomendaciones de diseño para la Zona bioclimática Ib, según IRAM 11603: 2011.

Tabla 1. Descripción de los componentes opacos y vidriados de la propuesta genérica (pg4).

DETALLES	PROPUESTA GENÉRICA (pg4)	Esp. (m)	Coef. Global de Pérdidas U (W/m ² C)	U (W/m ² C) IRAM Nivel Medio
	TECHO Placa autoportante de chapa con 0.10 m de aislamiento interior. *Terminación exterior reflectiva.	0.081	0.4	0,45 (IRAM 11605: 1996)
	MURO DOBLE: hoja de ladrillos comunes (vistos o con pintura reflectiva) de 0.12 m de espesor; aislamiento de poliestireno expandido (15 kg/m ³) de 0.025 m de espesor; hoja de ladrillos de 0.12 m de espesor terminado con revoque grueso y fino al interior.	0.30	0.8	1,1 (IRAM 11605: 1996)
	VENTANAS DVH laminado (6+12+6) perfilera de aluminio con RPT (U = 2.85 W/m ² C). * Dispositivo de protección tipo brise soleil con parasoles verticales móviles que cubren 100% del vano, según corresponda.	0.024	2.8	de 2,01 a 3,00 (Nivel Medio K4 IRAM 11507 4: 2010)

Se optimizó la forma, ubicación de las ventanas, con sistemas de accionamiento que permiten una buena uniformidad en la distribución espacial de la luz y una diferencia de presión que mejora la ventilación regulada al nivel del usuario. Las ventanas más expuestas se integraron con un sistema de “cajón” exterior o brise soleil con parasoles verticales móviles que permiten ser regulados en diferentes graduaciones según las necesidades diarias y estacionales, logrando un menor contraste de iluminancias. Sólo en casos de incidencia solar directa, se utilizaron cortinas “roller dobles”, con la posibilidad de atenuar la luz mediante un paño de transmitancia visible media u oscurecer totalmente el local, por ejemplo para realizar proyecciones visuales.

Con esta propuesta aplicada a los casos de estudio, se obtuvieron mejoras significativas que se reflejaron en la reducción del requerimiento de refrigeración, entre el 40 y el 60 % en promedio, según el caso, siendo determinante la configuración tipológica (abierta / compacta) en el correcto aprovechamiento de la energía solar como recurso renovable y en la regulación de las demás variables ambientales, mostrando un mejor comportamiento la tipología de planta abierta con dos frentes de iluminación y de ventilación.

A través del proceso de análisis estadístico de los datos medidos en los edificios escolares de Resistencia contrastados con las propuestas de simulación, se determinó que el Área de Envolvente Total (opaca + vidriada) es la

variable más influyente en las condiciones de discomfort higrotérmico, incluso que las áreas vidriadas consideradas individualmente. El aporte de cada componente (opaco y vidriado) está desfasado en el tiempo y ambos pueden conducir a sobrecalentamientos en sus periodos de actuación. Por lo tanto, es imprescindible que los edificios a proyectar verifiquen los valores U determinados en la Propuesta Genérica, previamente al cálculo y diseño de sus áreas vidriadas.

2.2. Procedimiento de cálculo.

La metodología de *Estimación del Factor de Vidriado (Fv) mediante “Regresión Lineal Multivariada”* permite una aplicación versátil del Fv, haciendo correlaciones de Fv (variable dependiente) con las variables de interés (independientes) A_v , $\bar{\alpha}$ y $A_{\text{envolvente}}$, para cada local de cada tipología, resolviendo este sistema de ecuaciones sobredimensionado con 3 incógnitas por ajuste de coeficientes. A continuación se describe el procedimiento de cálculo.

Dada una relación funcional entre las variables $\{F_v, \alpha, A_v \text{ y } A_{\text{envolvente}}\}$ tal que [Eq. (3)]:

$$F_v = A.\alpha + B.A_v + C.A_{\text{envolvente}} \quad (3)$$

donde A, B y C son coeficientes constantes a determinar por regresión multivariada y, conocidos m valores de cada una de

las variables independientes α , A_v y $A_{envolvete}$, se pueden obtener m valores de la variable dependiente F_v mediante su ecuación de definición [Eq. (4)]:

$$F_v = \frac{\alpha \cdot A_v}{(A_{envolvete} - A_v)} \quad (4)$$

Por lo tanto, el sistema de m ecuaciones con 3 incógnitas (A, B y C) queda expresado como [Eq. (5)]:

$$\begin{aligned} F_{v,1} &= A\alpha_1 + BA_{v,1} + CA_{envolv,1} \\ F_{v,2} &= A\alpha_2 + BA_{v,2} + CA_{envolv,2} \\ &\vdots \\ F_{v,m} &= A\alpha_m + BA_{v,m} + CA_{envolv,m} \end{aligned} \quad (5)$$

Matricialmente este sistema de ecuaciones sobredimensionado puede escribirse como [Eq. (6)]:

$$[A] \cdot [\overline{V}] = [\overline{F}] \quad (6)$$

donde la matriz A y los vectores V y F están dados por [Eq. (7)]:

$$[A] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & A_{v,1} & A_{envolv,1} \\ \alpha_2 & A_{v,2} & A_{envolv,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_m & A_{v,m} & A_{envolv,m} \end{bmatrix}_{(m \times 3)}$$

$$[\overline{V}] = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}_{(3 \times 1)} \quad [\overline{F}] = \begin{bmatrix} F_{v,1} \\ F_{v,2} \\ \vdots \\ F_{v,m} \end{bmatrix}_{(m \times 1)} \quad (7)$$

Para encontrar los valores de los 3 coeficientes A, B y C se pre-multiplica ambos miembros de la ecuación (6) por la matriz transpuesta de A , identificada como A^T , [Eq. (8)]:

$$[A]^T \cdot [A] \cdot [\overline{V}] = [A]^T \cdot [\overline{F}] \quad (8)$$

donde

$$[A]^T = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_m \\ A_{v,1} & A_{v,2} & \dots & A_{v,m} \\ A_{envolv,1} & A_{envolv,2} & \dots & A_{envolv,m} \end{bmatrix}_{(3 \times m)} \quad (8)$$

El producto de las matrices $A^T \cdot A$ da como resultado una matriz cuadrada de 3×3 elementos (3 filas y 3 columnas). Para despejar el vector de incógnitas V se debe pre-multiplicar ambos miembros de la ecuación (6) por la matriz inversa del producto $A^T \cdot A$ a la que designaremos como $[A^T \cdot A]^{-1}$ resultando [Eq. (9)]:

$$[[A]^T \cdot [A]]^{-1} \cdot [A]^T \cdot [A] \cdot [\overline{V}] = [[A]^T \cdot [A]]^{-1} \cdot [A]^T \cdot [\overline{F}] \quad (9)$$

El producto matricial completo que pre-multiplica al vector V da como resultado la matriz Identidad de orden 3 resultando [Eq. (10)]:

$$[I] = [[A]^T \cdot [A]]^{-1} \cdot [A]^T \cdot [A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(3 \times 3)} \quad (10)$$

Por lo tanto, el vector de variables V se calcula mediante el siguiente producto matricial [Eq. (11)]:

$$[\overline{V}] = [[A]^T \cdot [A]]^{-1} \cdot [A]^T \cdot [\overline{F}] \quad (11)$$

De esta forma se obtienen los tres coeficientes A, B y C de la ecuación (3) que correlaciona el factor de vidrio F_v con las 3 variables independientes que lo definen según la ecuación (4). Este método de ajuste multivariado es aplicable a cualquier problema donde se deba resolver un sistema sobredimensionado de m ecuaciones con n incógnitas siendo $m > n$ y puede resolverse fácilmente en Excel empleando sus funciones matriciales MMULT y MINVERSA.

Como datos de entrada, se utilizaron los valores de $\bar{\alpha}$, A_v y $A_{envolvete}$, correspondientes a los modelos optimizados de los edificios monitoreados (EP 1058, EP 373, EP 116, EP 26, ES COM., ES 75, JI 174) agrupándolos según su tipología, y se consideraron todas las orientaciones que podrían tener las aulas en cada edificio, no sólo las existentes. Para mayor precisión de los resultados se incluyeron sólo los locales con medidas estándar.

A los fines estadísticos, se aplicó a cada local de cada modelo el porcentaje estimado de A_v /Apiso para cada valor de $\bar{\alpha}$ en un rango de 0.75 a 0.2 (en orden decreciente) con intervalos de 0.05. Dichos límites máximo y mínimo provienen de los cálculos de $\bar{\alpha}$ verificados en las propuestas realizadas para los locales monitoreados, correspondiendo a $\bar{\alpha} = 0.75$ el valor que representa el 10 % del área de piso, que es el mínimo por normas. Al ir disminuyendo las absorbancias debería aumentar el A_v , por lo que se efectuó un cálculo proporcional para obtener los porcentajes de área de piso incrementados, con los cuales se calcularon las nuevas áreas vidriadas.

En el caso de tipologías de dos frentes de iluminación, se dividieron a la mitad las A_v obtenidas en cada orientación. Por consiguiente, a las A_v obtenidas en la orientación considerada, se suman las A_v de la orientación opuesta para verificar que cumplen con el porcentaje de área de piso correspondiente. En algunos casos de tipologías con distinta proporción de A_v en cada fachada expuesta, se realizaron los cálculos según la proporción de A_v correspondiente a cada fachada.

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos con esta metodología.

3. RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DEL F_v

A través de la metodología de estimación del Factor de Vidriado por Regresión Lineal Multivariada, se obtuvieron tres grupos de correlaciones para las cuatro orientaciones medias, diferenciando aulas comunes y aulas especiales y según el grado de exposición solar de la envolvente (con paredes y techos expuestos o sólo con paredes expuestas en el caso de edificios de dos niveles):

- A) Correlaciones para tipología de planta abierta (Escuelas primarias / secundarias / terciarias)
- B) Correlaciones para tipología de planta compacta (Escuelas primarias / secundarias / terciarias)
- C) Correlaciones para tipología compacta (Jardín de Infantes)

Para cada correlación obtenida, se verificó el grado de ajuste entre el F_v calculado con su ecuación de definición [Eq. (4)] y el F_v estimado mediante ajuste de coeficientes [Eq. (3)]. La Fig. 3 muestra la comparación del F_v calculado y estimado

usando las Correlaciones A.1. para aulas comunes con áreas vidriadas hacia las orientaciones NE - SO y SE - NO de la tipología de planta abierta.

Finalmente, las correlaciones obtenidas se presentaron en hojas de cálculo Excel individuales para facilitar su aplicación. Para utilizar estas correlaciones, el diseñador seleccionará la hoja de cálculo de la tipología edilicia a proyectar con la correlación Fv correspondiente a la orientación de interés. Propondrá los datos de entrada para el diseño de un local: $\bar{\alpha}$, A_v y $A_{envolvete}$. Con estos valores de entrada obtendrá el Fv que se utiliza para el cálculo del Av empleando la ecuación correspondiente [Eq. (2)]. Estos

resultados son devueltos automáticamente por las hojas de cálculo.

Si el valor de Av obtenido con esta ecuación no coincide con el propuesto inicialmente (ingresado en la correlación), se debe iterar hasta que la diferencia sea 0.00. La figura 4 muestra un ejemplo de la planilla de cálculo correspondiente a la correlación Fv de Aulas comunes con ventanas al NE, con valores convergentes y no convergentes.

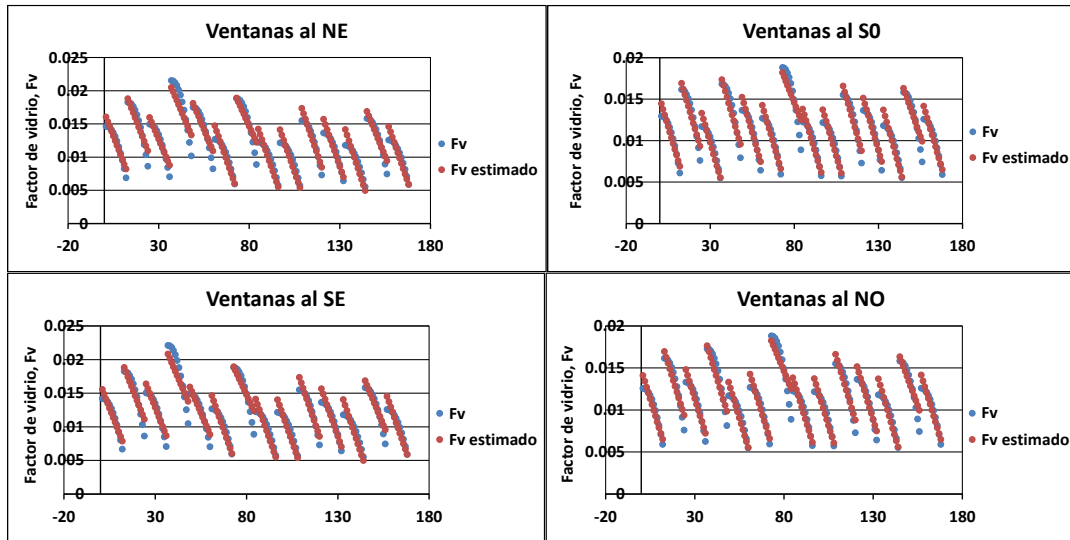


Fig. 3: Comparación Fv calculado y Fv estimado mediante Correlaciones A.1. Aulas comunes con Av al NE – SO y SE – NO.

Cuando se logra la convergencia entre ambos valores de Av (Diferencia = 0.00), se obtiene el valor de área vidriada que conduciría a un comportamiento termo-lumínico óptimo (dentro de los rangos de confort correspondientes), como se logró con la estrategia pg4 en los casos de referencia. Nótese en el ejemplo de la figura 4, que para un valor de absorptancia

solar de 0.7, se había propuesto un Av muy grande (7.2 m²) y cuando se iteró el valor del área vidriada propuesta, se logró la convergencia reduciéndolo a 3.10 m². Esto demuestra la importancia del color de terminación de las superficies exteriores en la fracción de radiación solar absorbida por la envoltente opaca.

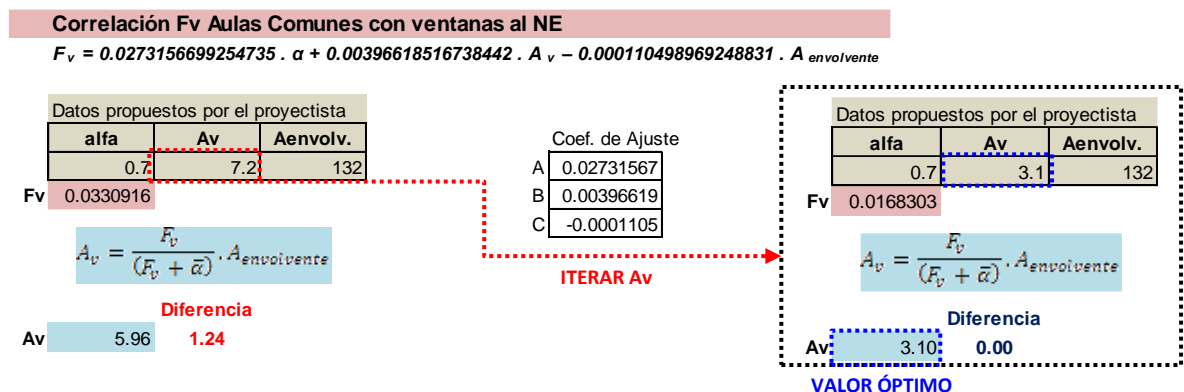


Fig. 4: Ejemplo planilla de cálculo de áreas vidriadas al NE. Valores de Av propuesta y Av obtenida mediante la ecuación: No convergentes (Diferencia = 1.24) vs. Convergentes (Diferencia = 0.00)

Como aplicación práctica de las correlaciones obtenidas se planteó un ejemplo básico para las tipologías de planta abierta y planta compacta. Dicha aplicación se realizó además con el fin de verificar la relación de superficies máximas de vidrio

por m² de fachada asoleada, teniendo en cuenta lo planteado en los fundamentos de la investigación: "a igual área de piso, un aula de base rectangular tiene más área de paredes expuestas al sol que uno de base cuadrangular de la misma

altura”, lo que puede originar mayores flujos de calor a través de los muros asoleados en el primer caso y, por consiguiente, dar lugar a sobrecalentamientos, por lo que sus áreas vidriadas deben diseñarse en forma diferenciada.

3.1. Ejemplo de Aplicación de Correlaciones para Cálculo de Áreas Vidriadas en Aulas Comunes Tipología de Planta Abierta.

En la figura 5 se muestra el modelo conformado por aulas de igual superficie (51.84 m²) de planta cuadrada y rectangular

de la misma altura (3 m). La fachada principal se halla expuesta y la fachada posterior, protegida por galería. El Área vidriada mínima total en aulas comunes según normas (10% del área de piso) es de 5.18 m².

En las figuras 6 a 9 se muestran los resultados obtenidos mediante las correlaciones correspondientes, para dos valores de absorción solar, 0.3 y 0.7, que se comparan por orientación.



Fig. 5: Ejemplo de aplicación Tipología de planta abierta. a) Esquema en planta; b) Perspectiva fachada expuesta; c) Perspectiva fachada protegida.

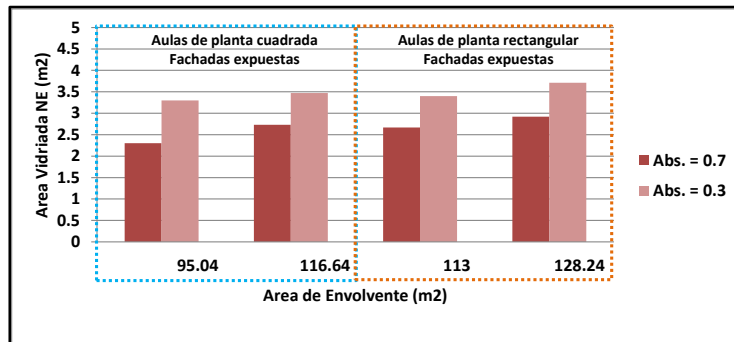


Fig. 6: Comparación de Av al NE, obtenidas para absorciones solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

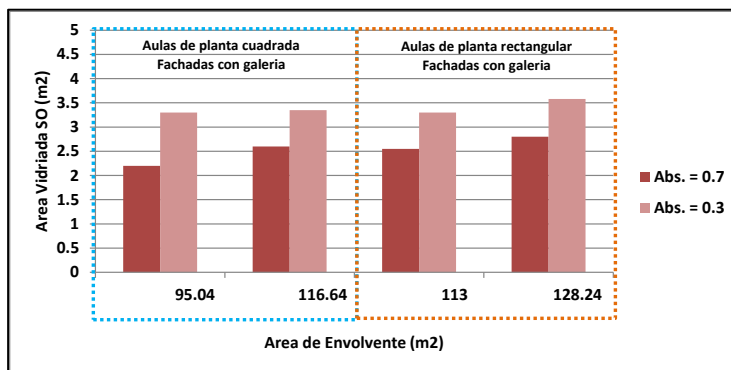


Fig. 7: Comparación de Av al SO, obtenidas para absorciones solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

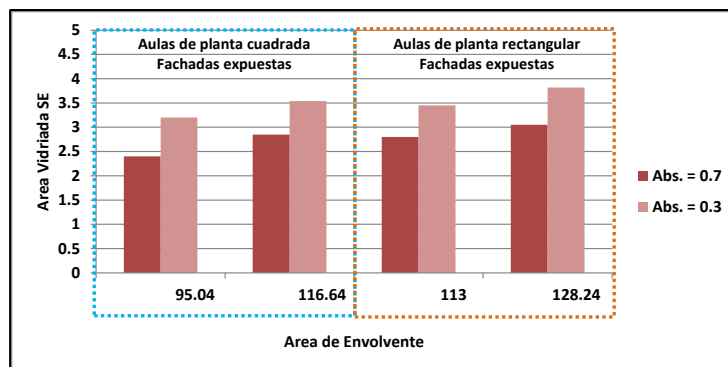


Fig. 8: Comparación de Av al SE, obtenidas para absorciones solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

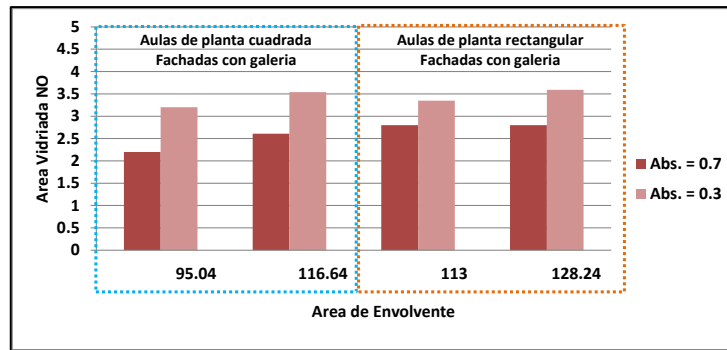


Fig. 9: Comparación de Av al NO, obtenidas para absorptancias solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

Todos los casos verifican el Área vidriada mínima total según normas o se aproximan a ella (10% del área de piso 5.18 m²). Los resultados se encuadran en lo esperado. Se verifica a mayor absorptancia, menor área vidriada. La diferencia es mayor en las aulas de más superficie expuesta, especialmente en las que tienen ventanas al NE.

Todos los casos verifican el Área vidriada mínima total según normas o se aproximan a ella. Se verifica, al igual que la tipología de planta abierta, que resultan menores las Av con $\bar{\alpha} = 0.7$. Además, se aprecia que las aulas con paredes y techos expuestos de mayor área de envoltente, tienen menor Av al NE, al SO y al NO.

3.2. Ejemplo de Aplicación de Correlaciones para Cálculo de Áreas Vidriadas en Aulas Comunes Tipología de Planta Compacta.

En la figura 10 se muestra el modelo conformado por aulas de igual superficie (51.84 m²) de planta cuadrada y rectangular de la misma altura (3 m), para poder comparar las distintas situaciones que podrían darse en una tipología en dos niveles, con una y dos fachadas expuestas. El Área vidriada mínima total en aulas comunes según normas (10% del área de piso) es de 5.18 m².

En los ejemplos analizados deberá adoptarse algún criterio de diseño para redondear los valores de Av, teniendo en cuenta el tipo de ventana y las medidas comerciales.

A través del procedimiento de Estimación del Factor de Vidriado mediante Regresión Lineal Multivariada, se verificó que las Av estimadas para las propuestas pg4 realizadas en los ejemplos hipotéticos, se hallan en un promedio adecuado. El cálculo iterativo de las áreas vidriadas resultó ágil y práctico mediante las planillas Excel desarrolladas como herramienta digital de diseño proyectual.

En las figuras 11 a 14 se muestran los resultados obtenidos mediante las correlaciones correspondientes, para dos valores de absorptancia solar, 0.3 y 0.7, que se comparan por orientación.



Fig. 10: Ejemplo de aplicación Tipología de planta compacta. a) Esquema en planta; b) Perspectiva fachadas expuestas; c) Esquema en corte perspectivado.

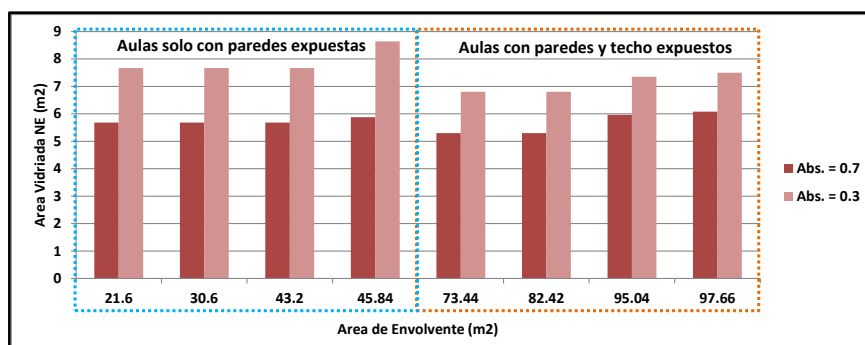


Fig. 11: Comparación de Av al NE, obtenidas para absorptancias solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

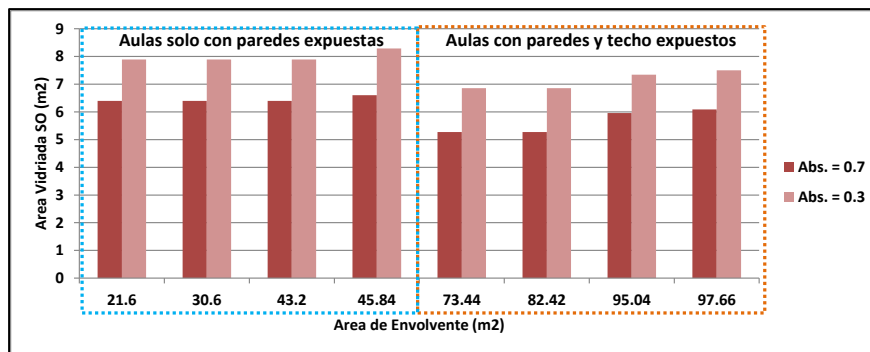


Fig. 12: Comparación de Av al SO, obtenidas para absorptancias solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

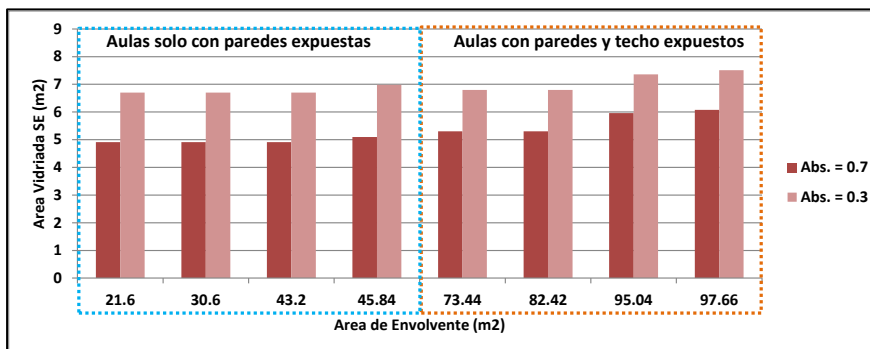


Fig. 13: Comparación de Av al SE, obtenidas para absorptancias solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

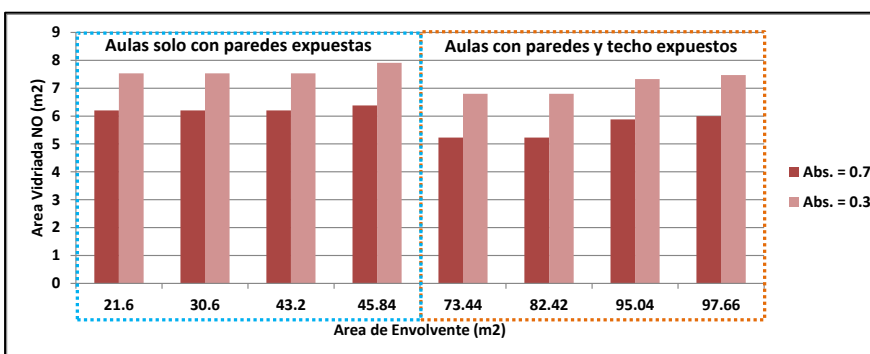


Fig. 14: Comparación de Av al NO, obtenidas para absorptancias solares de 0.3 y 0.7 mediante correlación.

En base a los valores de Av obtenidos, se calcularon las relaciones de Área Vidriada por Área de Fachada en que se encuentran las ventanas (AV/AF), resultando para la tipología de planta abierta, relaciones promedio de entre 8 y 16% y para la tipología de planta compacta, entre 17 y 37% pues tiene un solo frente de iluminación y ventilación. Pero además, dichas relaciones de AV/AF se diferencian según el Área de envolverte total expuesta y la absorptancia solar promedio ponderada de las superficies exteriores.

4. CONCLUSIONES

En los dos ejemplos hipotéticos analizados se han verificado distintas relaciones de superficies óptimas de vidrio por m² de fachada soleada, en aulas de planta rectangular y cuadrangular a igual área de piso, según su tipología, orientación y número de superficies expuestas al exterior. Por lo tanto, este hallazgo amplía lo establecido por el Reglamento de Construcciones de la ciudad de Resistencia vigente, que determina sólo Av mínima como 10 % de la superficie de piso, sin considerar las otras variables de

proyecto (área de envolverte total y absorptancia solar exterior).

Teniendo en cuenta dichas consideraciones, con la metodología de Estimación del Factor de Vidriado mediante Regresión Lineal Multivariada, que relaciona las variables más importantes en juego (Av, $\bar{\alpha}$ y A_{envolverte}), se podrán adoptar los valores de áreas vidriadas obtenidas por cálculo, con la certeza de que permitirán lograr las condiciones de confort termo-lumínico, pues éstas son el resultado del extenso análisis estadístico de monitoreos y propuestas de mejora para prototipos escolares representativos de zonas urbanas de clima cálido - húmedo de la Región N.E.A.

Con base en todo lo realizado, se han cumplido plenamente los objetivos iniciales de la investigación, logrando aportes concretos para su transferencia al Ministerio de Educación de la provincia del Chaco como principal beneficiario, además de herramientas metodológicas extrapolables a otras regiones bio-ambientales.

Ante la difícil tarea de integrar el confort térmico y visual en el diseño de locales educativos, se propone que las planillas de correlaciones (Fv) constituyan una nueva herramienta de diseño dirigida a los profesionales y un precedente de nivel científico a la hora de actualizar las normativas municipales o provinciales. De esta forma, se concretará su validación general al considerar nuevas situaciones de análisis, ya que no constituye una metodología cerrada sino que es factible actualizarla con aportes emergentes.

El Factor de Vidriado (Fv) también puede constituir un indicador de interés para la evaluación técnica e instrumental de la calidad de la envolvente urbana y como punto de partida para futuras políticas de ahorro energético en el sector educativo de la Región N.E.A.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte de la Tesis de Doctorado en Ciencias - Área Energías Renovables desarrollada por la Dra. Arq. María Laura Boutet y dirigida por el Dr. Alejandro Luis Hernández, "Acondicionamiento higrotérmico – lumínico de edificios escolares en zonas urbanas de la Región NEA. Auditorías energéticas y propuestas de mejoras mediante Diseño Solar Pasivo", Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional de Salta (FCE – UNSa.). La misma fue parcialmente financiada mediante las Becas Internas de Postgrado Cofinanciadas Tipo I y Tipo II del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y con el aporte especial del Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Provincia del Chaco, que proporcionó el instrumental de medición solicitado para ejecutar las auditorías energéticas en los establecimientos educativos, en el marco de un Acuerdo de Trabajo suscripto para tal fin, y a cuyas autoridades expresamos nuestro más sincero agradecimiento.

REFERENCIAS

- Abanda F.H. and Byers L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, **97**: 517-527. DOI:[10.1016/j.energy.2015.12.135](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135)
- Boutet M.L., Hernández A.L. y Jacobo G.J., (2013). Propuesta de Optimización del Comportamiento Higrotérmico – Lumínico, de un Edificio Escolar de la Región N.E.A., a partir de Monitoreo y Simulación en Período de Otoño. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, **17**, 05.01-05.10, 2013. ISSN: 2314 – 1433, Argentina.
- Boutet M.L., Hernández A.L. y Jacobo G.J., (2014) Implementación de Auditorías Energéticas en Establecimientos Educativos de la ciudad de Resistencia, Chaco. Acuerdo de Trabajo FAU, UNNE – MECCyT. Revista ADNea (Arquitectura y Diseño del Nordeste Argentino), Edición N° 2, pp 153 - 164, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Resistencia, Chaco. ISSN: 2347–064X.
- Boutet M.L. (2017). Acondicionamiento higrotérmico-lumínico de edificios escolares en zonas urbanas de la región N.E.A.. Auditorías energéticas y propuestas de mejoras mediante diseño solar pasivo. Tesis Doctoral. Director: Hernández A.L. Codirector: Jacobo G.J. – Texto impreso 1° Edición (434 pp y anexos), Idioma Español, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Salta Capital, República Argentina.
- Boutet M.L. ; Hernández A.L.; Jacobo G.J. (2020). Methodology of quantitative analysis and diagnosis of higro-thermal and lighting monitoring for school buildings in a hot-humid mid-latitude climate. *Renewable Energy* **145** 2463 – 2476. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.009>
- Capeluto G. (2019). Adaptability in envelope energy retrofits through addition of intelligence features. *Architectural Science Review*, **62**:3,216-229. DOI: [10.1080/00038628.2019.1574707](https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1574707)
- Chiesa G., Acquaviva A., Grosso M., Bottaccioli L., Florida M., Pristeri E. and Sanna E. (2019). Parametric Optimization of Window-to-Wall Ratio for Passive Buildings Adopting a Scripting Methodology to Dynamic-Energy Simulation. *Sustainability* **11**(11):3078. DOI: [10.3390/su11113078](https://doi.org/10.3390/su11113078).
- Filippín C., Flores Larsen S. y Marek L. (2020) Performance térmico energética de un edificio bioclimático en una zona de alta radiación de argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **45**, 21 - 31. ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932X.
- Filippín C. and Beascochea A. (2007), Performance assessment of low-energy buildings in central Argentina. *Energy & Buildings* **39**, 546-557. DOI: [10.1016/j.enbuild.2006.08.011](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.011)
- Futrell BJ, Ozelkan EC, Brentrup D. (2015). Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. *Build Environ*; **92**:561–602. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.039>
- Goia F, Haase M., Perino M. (2013). Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective. *Appl Energy*; **108**:515–27. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.063>
- IRAM 11603 (2011). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 11605 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Método de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 11507 4 (2010). Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas exteriores. Parte 4. Requisitos complementarios. Aislación térmica. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Lartigue B, Lasternas B, Loftness V. (2014). Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. *Indoor Built Env*; **23**:70–80. DOI:[10.1177/1420326X13480224](https://doi.org/10.1177/1420326X13480224)
- Ledesma, S. et al. (2016) Caracterización del sector edilicio educativo de nivel primario de la provincia de Tucumán y evaluación de consumos energéticos en casos de estudio. *Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 05.83-05.94. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65552>
- MCEN (1996) Ministerio de Cultura y Educación de la Nación, Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar, Cap. IV. Condiciones de habitabilidad.
- Mangkuto Rizki A., Rohmah Mardiyah, Asri Anindya Dian (2016). Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. *Applied Energy*. **164**, 15, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.046>

- Ochoa CE, Aries MBC, van Loenen EJ, Hensen JLM. (2012) Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Appl Energy*; **95**:238-45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>
- Ré M. G. y Bianchi M. F. Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **45**, 39 - 49, 2020. ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932X.
- Reglamento General de Construcciones (1990). Ordenanza N° 1681. Municipalidad de Resistencia, Provincia del Chaco.