



Variables ambientales y la relación capilaridad-deterioro: viviendas coloniales del centro histórico de Santiago de Cuba

Environmental variables and capillarity-deterioration relationship: colonial buildings of the historic centre of Santiago de Cuba

Mayelin González Trujillo, Eduardo Beira Fontaine, Odalys Álvarez Rodríguez y Elsi María López Arias

RESUMEN: Esta investigación se realizó en el centro histórico de la ciudad de Santiago de Cuba, área que presenta condiciones ambientales propicias para la presencia de la relación capilaridad-deterioro en edificaciones. La misma tuvo como objetivo determinar la influencia de las variables ambientales que modulan la relación capilaridad-deterioro en edificaciones a través de una herramienta que permita su estudio y monitoreo, tomando como caso a las viviendas coloniales. Se aplicaron métodos teóricos y empíricos; y como novedad se introdujo el método de modelación en un sistema de información geográfica. Como resultado fundamental se obtuvo que la profundidad del nivel freático es concluyente en la manifestación de la relación capilaridad-deterioro, siendo efectiva hasta una profundidad de 3 m. A esta variable se asocia el tipo de suelo, determinándose que los suelos finos son los más perjudiciales. Los resultados permitieron demostrar también otros factores influyentes como la orientación geográfica de la fachada y el tipo modular de material de construcción.

PALABRAS CLAVE: variables ambientales, relación capilaridad-deterioro, viviendas coloniales, Centro Histórico.

ABSTRACT: This research was conducted in the historic centre of Santiago de Cuba city; this area presents an appropriate environmental condition to investigate the capillary-deterioration phenomena in building. The general aim focused in determine the influence of environmental variables that modulate the relationship capillarity - deterioration in buildings through a tool to study and monitoring, taking as an example the colonial houses. We applied theoretical and empirical methods, and was introduced as a new modeling method on a geographical information system. As a main result it was found that the depth of the water table is conclusive demonstration of capillary-deterioration relationship, being effective to a depth of 3m. This variable is associated with soil type, concluding that fine soils are the most harmful. The results allowed to show also other contributing factors such as the geographical orientation of the façade and the modular type of construction material.

KEYWORDS: environmental variables, capillary-deterioration relationship, colonial buildings, historic centre.

Introducción

Los centros históricos demandan cada vez más de la atención de la humanidad en pos de su conservación, ya que sus edificaciones se han visto afectadas por factores de origen socio-económico y ambiental que provocan su deterioro con el paso de los años. La humedad es una lesión que se considera significativa en el proceso patológico de estas edificaciones, lo que supone un riesgo potencial de daño de los elementos constructivos que dan origen a otras patologías que aceleran el proceso de deterioro.

La humedad por capilaridad que tiene su principio en los fenómenos capilares, se agudiza a través de la interacción de la edificación con las características ambientales del entorno [1]. Esta lesión se declara como una de las que más incide en el proceso de deterioro de las edificaciones [2]. Su causa principal está dada por la presencia de agua subterránea, la cual en su recorrido por los estratos del suelo se carga con sales disueltas que al penetrar por la red de capilares en los materiales de construcción, interactúan con estos y los van degradando hasta provocar su fallo.

A esta relación que existe entre la lesión y el deterioro, se le designa en la investigación como relación capilaridad-deterioro en edificaciones. En su comportamiento, intervienen variables ambientales que son significativas, ya que al interrelacionarse incrementan el riesgo de deterioro de la edificación ante los efectos de la capilaridad.

Entre las variables ambientales fundamentales, en este estudio se consideraron la profundidad del nivel freático, el tipo de suelo y la humedad del suelo, que al combinarse con las características climáticas del área, como: la temperatura, la humedad relativa, la incidencia de la radiación solar y la velocidad y la dirección del viento, pueden modificar la altura capilar y acelerar el proceso de deterioro, en dependencia del tipo de material de construcción.

Estas variables, además se encuentran inmersas e influidas por los constantes cambios climáticos; esto implica una nueva variabilidad en el proceso que puede radicar en el incremento del deterioro, por lo que es necesario contar con criterios que permitan modelarlas y monitorearlas en su medio de actuación. Por estas razones, conocer cuáles son sus influencias en las distintas localidades donde se presenta el fenómeno de humedad por capilaridad y poder estudiarlas a través de su modelación en un sistema de información geográfica, en opinión de los investigadores constituye una herramienta de trabajo novedosa que aportará los criterios para una mejor planificación y control de las políticas a adoptar en función de lograr una mejor gestión del deterioro.

Según se constató en los estudios previos, existen investigaciones a nivel internacional [3] y nacional [4], [5] que aplican el enfoque sistémico en el estudio de estas variables ambientales y las lesiones en las edificaciones, pero en ninguna de ellas se propone una herramienta que permita mostrar su interrelación según los escenarios de actuación del fenómeno y cómo poder monitorearlas.

En el centro histórico de Santiago de Cuba existen condiciones ambientales favorables para la manifestación de la relación capilaridad-deterioro. Se ha demostrado que las edificaciones sufren deterioro por causa de la humedad capilar [6] y dentro de estas en especial, las viviendas coloniales [7].

En la figura 1, 2 y 3 se muestran viviendas coloniales deterioradas por los efectos de la humedad capilar. Ante esta situación, la Oficina del



Figuras 1, 2 y 3. Efectos de la humedad capilar y el deterioro en viviendas coloniales. Fuente: autores.

Conservador de la Ciudad (OCC), tiene como objetivo rescatarlas, a través de un análisis de forma integral, vinculando a todos los elementos de la ciudad y el entorno.

Los argumentos anteriores revelan la necesidad de estudiar cómo influyen estas variables en el comportamiento de la relación capilaridad-deterioro en las edificaciones y justifican la creación de una herramienta que permita determinar su interrelación en espacio y tiempo, tomando como caso de estudio las viviendas coloniales de la zona del centro histórico de la ciudad de Santiago de Cuba.

Materiales y métodos

En el estudio se utilizó un enfoque sistémico y multidisciplinar, donde se considera la interrelación del entorno con la edificación. De acuerdo con este criterio, se siguió el siguiente procedimiento:

1er paso: Ubicación del área de estudio

El Centro Histórico santiaguero, queda limitado en el norte por el Paseo Martí, hacia el sur por la Avenida 24 de Febrero, también conocida como (Trocha), hacia el este por la Plaza de Marte y hacia el oeste por la Avenida Jesús Menéndez (La Alameda), y se encuentra ubicado geográficamente entre las coordenadas planas rectangulares norte: 151 850–153 500 y este: 603 970–606 400. Partiendo de la morfología y características topográficas, el mismo posee una parte o zona baja (ver figura 4), la cual está comprendida en la primera terraza, por lo que posee características ambientales idóneas para la manifestación de la humedad capilar.

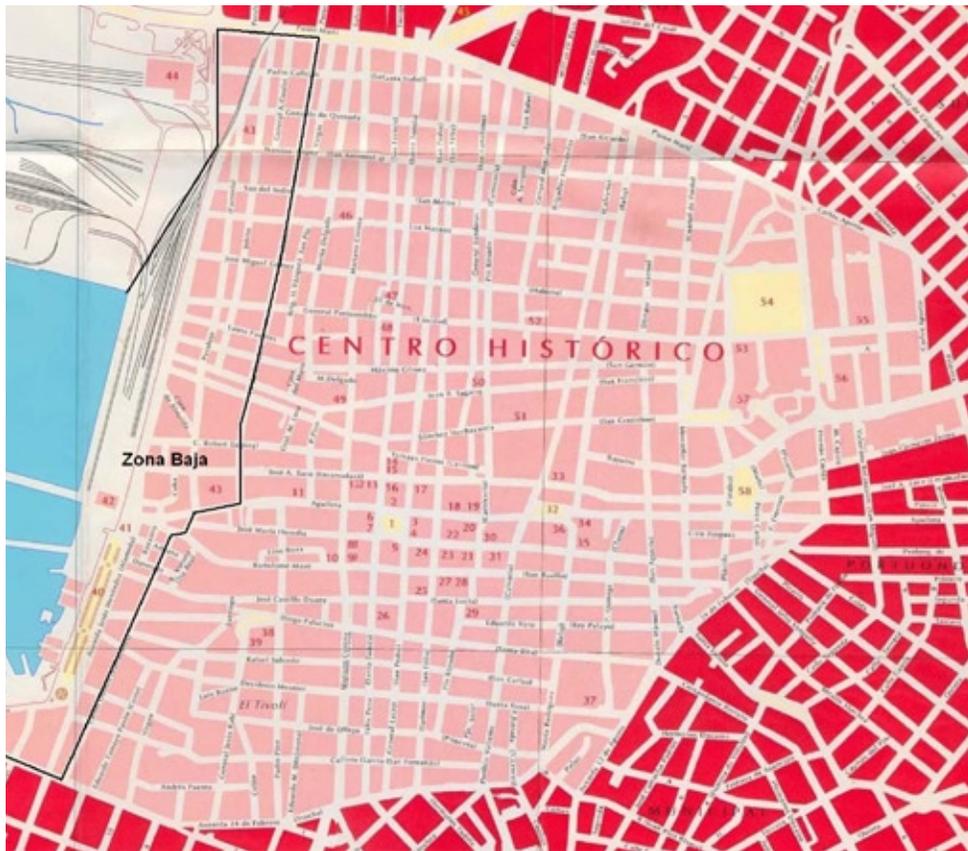


Figura 4. Ubicación del centro histórico de la ciudad de Santiago de Cuba y su zona baja. Fuente: Guía de Arquitectura; 2002.

1. GARCÍA MORALES, Soledad. "Metodología de diagnóstico de humedades de capilaridad ascendente y condensación higroscópica, en edificios históricos". [en línea]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2005. [Consulta: 22 de septiembre de 2012]. Disponible en: http://oa.upm.es/10159/1/SOLEDAD_GARCIA_MORALES.pdf
2. BARRIOS SEVILLA, Jesús; MENA ANISI, Antonio; VALVERDE ESPINOSA, Ignacio; BARRIOS PADURA, Ángela y POLO VELASCO, Jorge. "Estudio de la iglesia de San Miguel de Morón (Sevilla). Influencia de los cambios de humedad en la estabilidad del monumento". *Informes de la construcción*. [en línea]. 1999, Vol. 51, núm. 463, pp. 57-65. [Consulta: 12 de enero de 2012]. Disponible en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/865/949>
3. PRONE, Pablo Andrés. "Proceso para interpretación patológica en las edificaciones". Director: Guillermo García. Buenos Aires: Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio, Patología de los Materiales de Edificios de Valor Patrimonial, 2005.
4. AVILÉS, Diana: "Enfoque sistemático de la contaminación del centro histórico. El caso Camagüey". Director: Adolfo Alonso González. Tesis de Doctorado. ISJAE. Facultad de Arquitectura, La Habana, 1995.
5. PÉREZ ECHAZÁBAL, Lucrecia. "Influencia del medio ambiente en la patología de los monumentos de alto valor histórico construidos con materiales pétreos naturales. Centro histórico de La Habana". Director: Pedro Tejera Garófalo. Tesis de Maestría. ISJAE. Facultad de Arquitectura, La Habana, 2000.
6. GONZÁLEZ TRUJILLO, Mayelin; GALBÁN RODRÍGUEZ, Liber; QUIALA ORTIZ, Elio y CHÁVEZ RODRÍGUEZ, Javier. "Empleo de Sistemas de Información Geográfica en la determinación de la susceptibilidad a la humedad capilar en edificaciones del Centro Histórico de Santiago de Cuba". *Mapping*. [en línea]. 2010, núm. 142, pp. 38-45. [Consulta: 12 de enero de 2012]. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3254004>
7. FRÍAS HERRERA, Eugenio Ernesto. "Comportamiento de la humedad capilar en edificaciones coloniales de la zona baja del centro histórico de la ciudad de Santiago de Cuba". Director: Mayelin González Trujillo, Elsi M. López Arias, Martha C. Mesa Valenciano. Universidad de Oriente. Facultad de Construcciones, Santiago de Cuba, 2010.

2do paso: Características ambientales del área

Desde principio del siglo XVI, el Centro Histórico santiaguero, con su abrupta topografía y singularidades sísmicas y climáticas, ha legado las tradiciones de la época colonial, con construcciones impregnadas de belleza arquitectónica y gracia natural, por lo que proporciona una imagen única por sus ubicaciones, las cuales representan el 21 % de las edificaciones de la ciudad. Por su topografía accidentada, las calles en su mayoría son estrechas y sinuosas, adaptadas al terreno, en algunos casos se destacan escalinatas y callejones, respetando los desniveles existentes en el diseño de las edificaciones.

Estas características del relieve de terrazas en descenso y la disposición de tipología urbana compacta con homogeneidad en la altura de las edificaciones (ver figura 5A), implican que en esta área, se delimitan tres zonas [8] (ver figura 5B):

- Zona 1: Son áreas soleadas, ventiladas y con poca humedad que corresponden a superficies de explanación ubicadas en los escalones superiores de las terrazas donde la radiación del sol es efectiva desde el amanecer hasta el ocaso; los vientos inciden con efectividad en todos sus rumbos principalmente los diurnos (brisa marina).
- Zona 2: Son áreas soleadas y poco ventiladas que corresponden a las ubicadas en sombra de vientos locales los cuales se interfieren por las formas del relieve, el sol es efectivo avanzada la mañana y primeras horas de la tarde.

8. IVONNET, Edgar: Calentamiento global; determinación de zonas "Isla Calor" en la cuenca de Santiago de Cuba. Santiago de Cuba: IPF PMA, 1997.



Figura 5A. Vistas panorámicas del centro histórico de la ciudad de Santiago de Cuba.

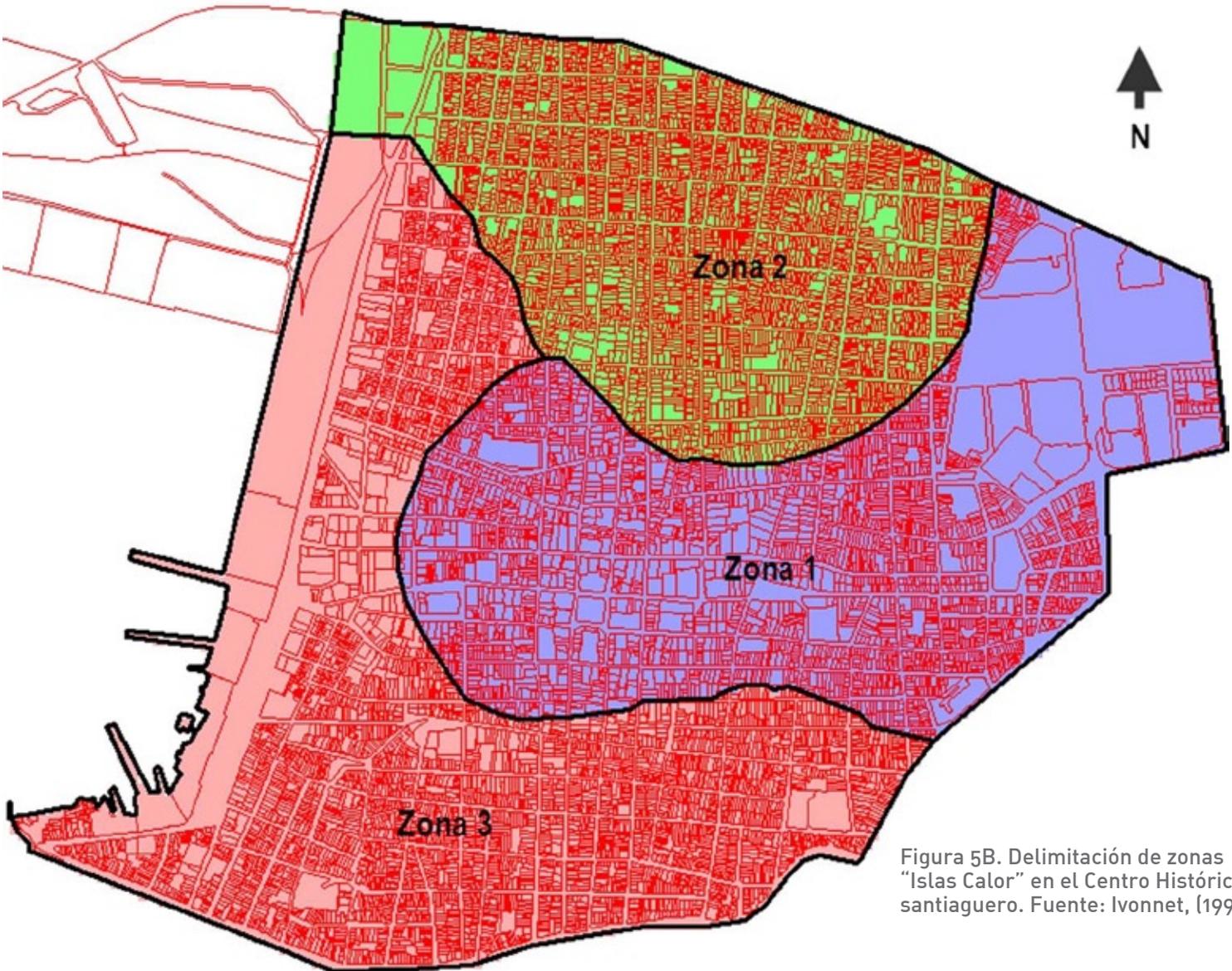


Figura 5B. Delimitación de zonas "Islas Calor" en el Centro Histórico santiaguero. Fuente: Ivonnet, (1997)

- Zona 3: Son áreas bajas, húmedas y poco ventiladas que corresponden a zonas bajas de la ciudad, coincidiendo con las líneas originales del escurrimiento teniendo interferencia de luz solar y de los vientos locales.

Como se puede observar en la figura 5, dentro del centro histórico, su zona baja corresponde a las características de la zona 3.

Las precipitaciones se manifiestan en dirección norte-noreste, con predominio al noreste. Tienen como valor promedio histórico 1 905,5 mm. Se definen dos períodos o estaciones: el período seco (noviembre-abril) y el período húmedo (mayo-octubre), mostrando su mayor intensidad en los meses de mayo, septiembre y octubre.

Los vientos circulan en la dirección norte-noreste y sur-suroeste, permitiendo la circulación de las corrientes de aire en las calles orientadas en la dirección norte-sur.

El valor promedio histórico de la humedad relativa en una serie de 12 años, es de 75,5 %, con valores mínimos de 72,1 % y máximo de 78,9 %, valores que propician un alto contenido de humedad en el ambiente; situación que favorece el fenómeno de humedad en las edificaciones.

La temperatura en la zona oscila entre 25,7 a 27,1 °C en invierno y de 31 a 34 °C en los meses más cálidos (junio-septiembre).

Las características hidrogeológicas se pueden observar en los modelos digitales de profundidad del nivel freático y humedad del suelo y en el mapa temático de tipo de suelo. Los mismos se realizaron a través de un sistema de información geográfica y datos de 189 perforaciones de estudios de suelos realizados en la zona y en puntos aledaños a esta. Estos datos fueron obtenidos de los archivos de la Empresa de Investigaciones Aplicada (ENIA) de la ciudad de Santiago de Cuba [9].

En el modelo digital de profundidad del nivel freático (ver figura 6), se puede observar que los valores oscilan desde 0,50 hasta 10,00 m. Los valores más bajos (0,50–4,00 m) se encuentran en la zona baja, lo que expone un escenario propicio para la manifestación de la humedad capilar en las edificaciones de esta zona.

El mapa temático de tipo de suelo, se elaboró considerando el estrato de suelo predominante hasta una profundidad de 5,00 m. Se demostró que en el centro histórico existen los suelos arcillosos, margosos, limosos y calizos, con predominio de suelos arcillosos en la zona baja, el cual se comporta como cieno en la parte más próxima a la bahía. La capacidad de ser suelos muy finos, proporciona en la zona baja, que la franja capilar alcance alturas de más de 1 m (figura 7).

El modelo digital de humedad del suelo (ver figura 8) indica que en la zona predominan valores entre 25–40 % de humedad, encontrándose en la zona baja, los valores más altos, los que se consideran como suelos muy húmedos, por tener el grado de saturación entre un 75–98 %.

9. GONZÁLEZ TRUJILLO, Mayelin; BEIRA FONTAINE, Eduardo; ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Odalys y QUIALA ORTÍZ, Elio: "La cuenca hidrográfica y su influencia en la relación capilaridad-deterioro en edificaciones costeras: caso zona baja del Centro Histórico santiaguero". En: *Actas de la XXXII Convención Panamericana de Ingenierías UPADI 2012*. La Habana: Editorial Obras, 2012. ISBN: 978-959-247-094-1

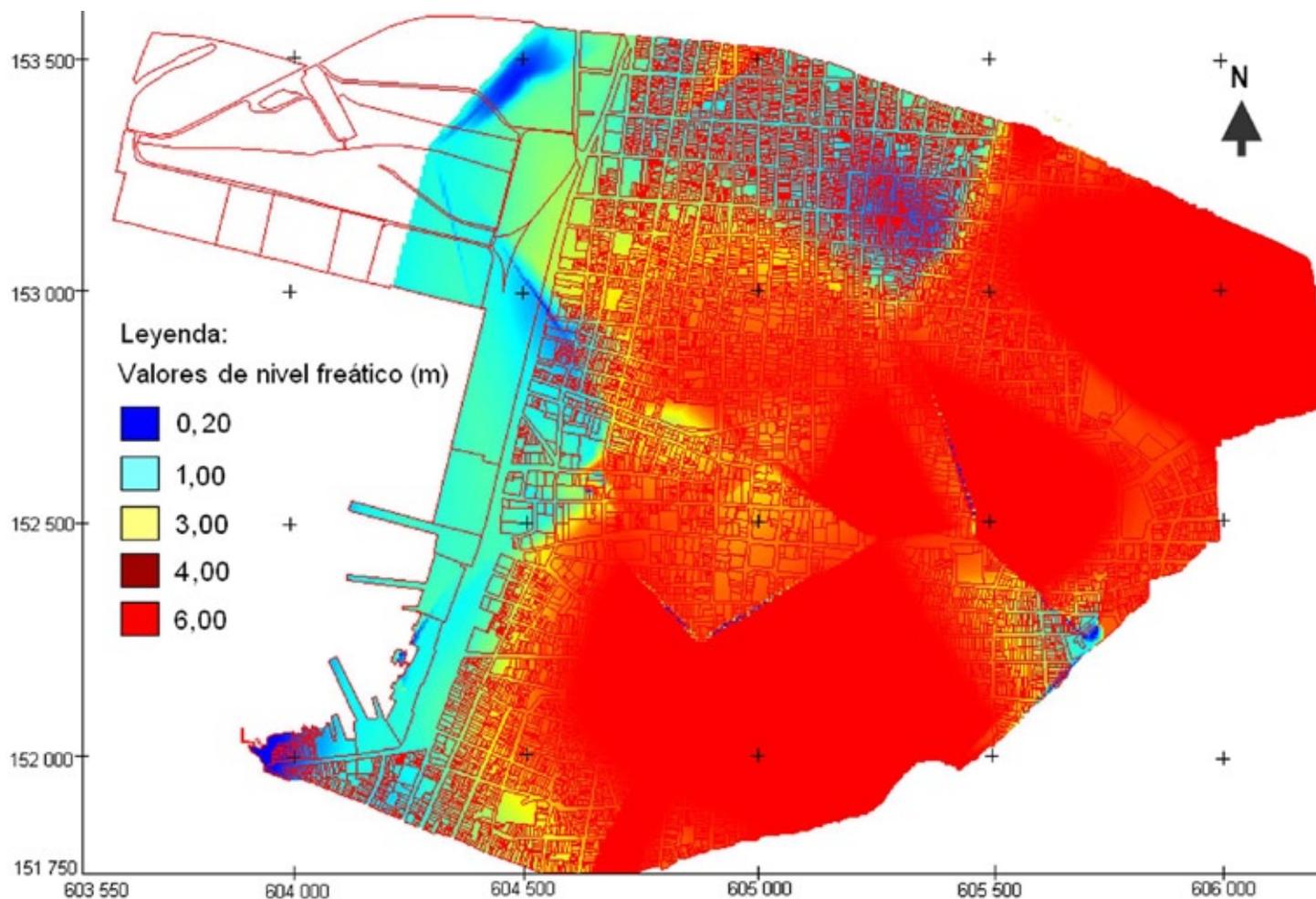


Figura 6. Modelo digital de la profundidad del nivel freático en el Centro Histórico santiaguero. Fuente: González *et al*, 2012.

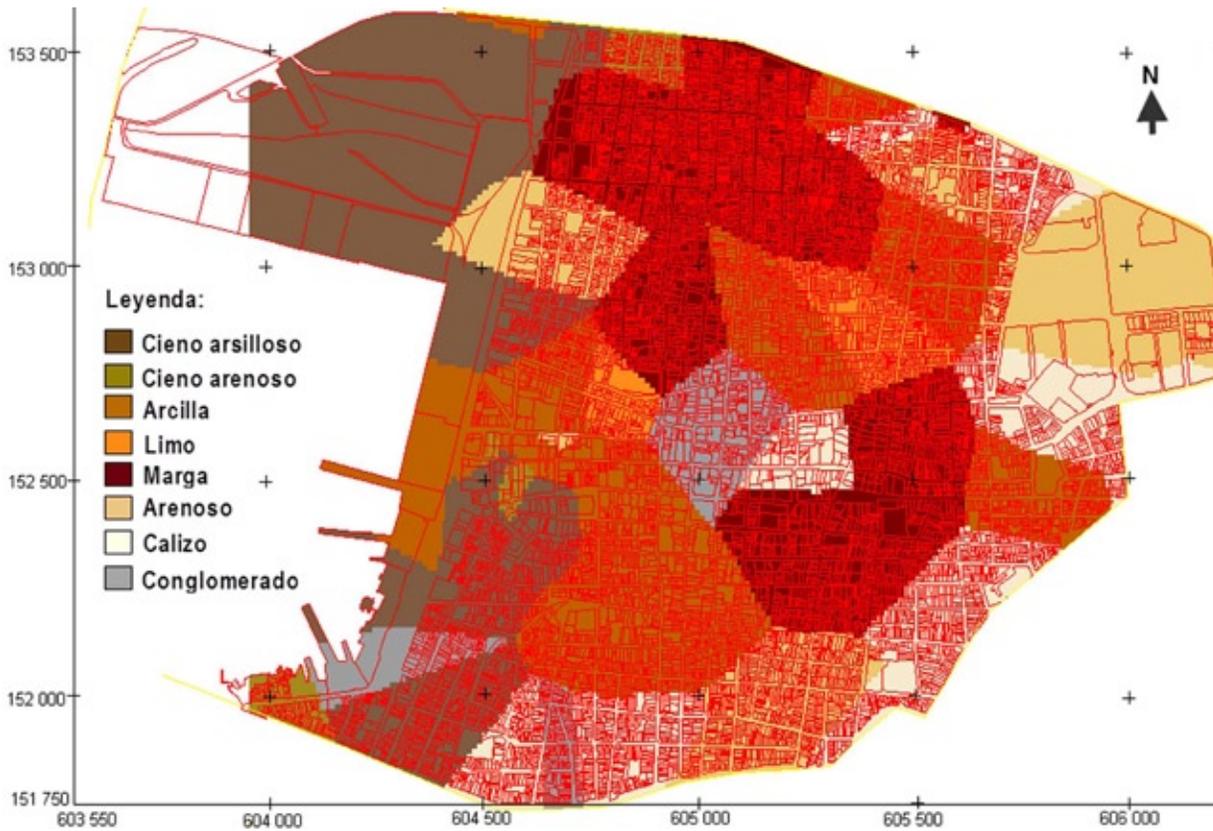


Figura 7. Mapa temático del tipo de suelo en el Centro Histórico santiaguero. Fuente: González *et al*, 2012.

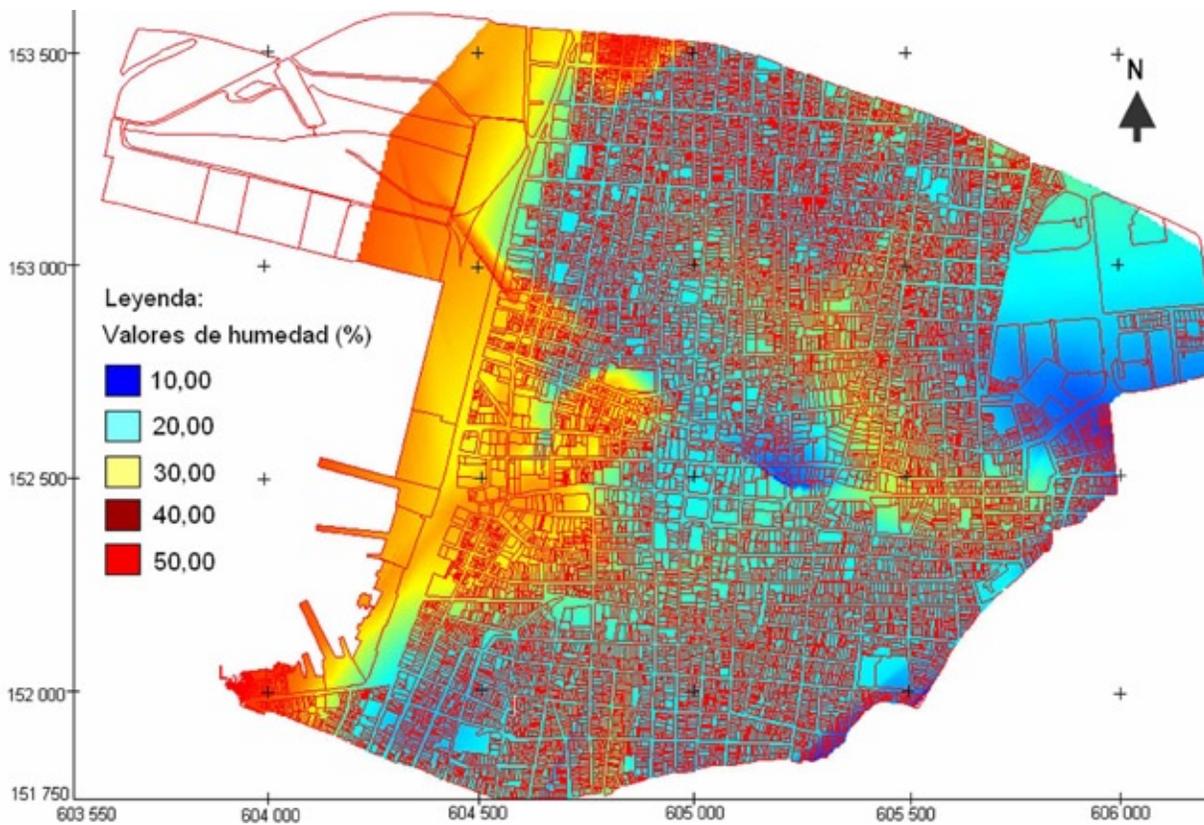


Figura 8. Modelo digital de humedad del suelo en el Centro Histórico santiaguero. Fuente: González, *et al*, 2012.

3er paso: Selección de la muestra

En el levantamiento del fondo habitacional se aplicó el método de observación libre y se analizaron las edificaciones por tipo de fachada y estado actual de las mismas. Como antecedentes se utilizaron los planos de ubicación de las viviendas en estudios [7], [10]. Especial atención fue dada a la zona baja por ser el área dentro del centro histórico con características ambientales idóneas para la manifestación de los deterioros productos de la humedad capilar.

Según el inventario realizado [10] existen 258 viviendas coloniales en el centro histórico, de las cuales 140 son de fachada simple (54,3 %), 100 de corredor (38,7 %) y 18 con balcones (7 %).

De este total de viviendas, 56 están transformadas y en la zona baja aparecen cinco con posibilidades de derrumbe total, razón por la cual la muestra queda reducida a 197 viviendas, para el análisis de selección.

En la selección de la muestra utilizada en esta investigación, se empleó el muestreo no probabilístico por juicio, donde el investigador utiliza su criterio para seleccionar a los miembros de la población que pueden generar muestras representativas.

Los criterios de selección para definir las viviendas a investigar fueron:

1. Edificaciones que conservaban su estilo arquitectónico, con transformaciones no representativas, las cuales a su vez son dirigidas por la Oficina del Conservador de la Ciudad (OCC) en su programa de restauración, tales como son: el cambio de cubierta y tratamiento de terminación en las fachadas.

2. Edificaciones ubicadas en escenarios donde haya mayor influencia de las variables profundidad del nivel freático, así como el tipo y porcentaje de humedad del suelo.

A partir de estos criterios de selección la muestra quedó conformada por 82 viviendas, lo que representa el 41,6 %. Ver tabla 1 y figura 9.

Tabla 1. Composición de la muestra.

Tipo de fachada	Población total	Viviendas transformadas	Porc. del total	Viviendas en derrumbe	Porc. del total	Viviendas en estudio	Muestras según criterio de selección	Porcentaje de muestras de estudio
Simple	140	34	24,29	2	1,40	104	45	43,27
Corredor	100	19	19,00	2	2,00	79	30	37,97
Balconaje	18	3	16,67	1	5,50	14	7	50,00
Total	258	56	21,71	5	1,94	197	82	41,62

4to paso: Procedimiento experimental

Las mediciones se hicieron en el período de lluvia, en el mes de mayo.

Variables a medir

Los valores de las variables (tipo de suelo, profundidad del nivel freático a partir del nivel de calle y humedad del suelo) que corresponden a las viviendas de la muestra se determinaron a través de los modelos digitales de (nivel freático y humedad del suelo) y el mapa temático de tipo de suelo, confeccionados a través de un sistema de información geográfica [9]. Estos modelos fueron debidamente calibrados en este estudio, a través de 10 calas que se realizaron en la zona baja, por ser un área con profundidades del nivel freático cercanas a la superficie. Estas calas permitieron el monitoreo de estas variables.

Tipo de material: se define esta variable a través del análisis de los tipos modulares de material de construcción de la fachada. En este caso, aparecen los tipos:

- mampuesto con morteros y revestimientos de cal y arena.
- ladrillo con mortero y revestimientos de cal y arena.

10. LÓPEZ ÁRIAS, Elsi María:

“Comportamiento de las lesiones y estado actual de las viviendas coloniales en el Centro Histórico de Santiago de Cuba”. Director: Pedro Tejera Garófalo. Universidad de Oriente. Facultad de Construcciones, Santiago de Cuba, 2004.

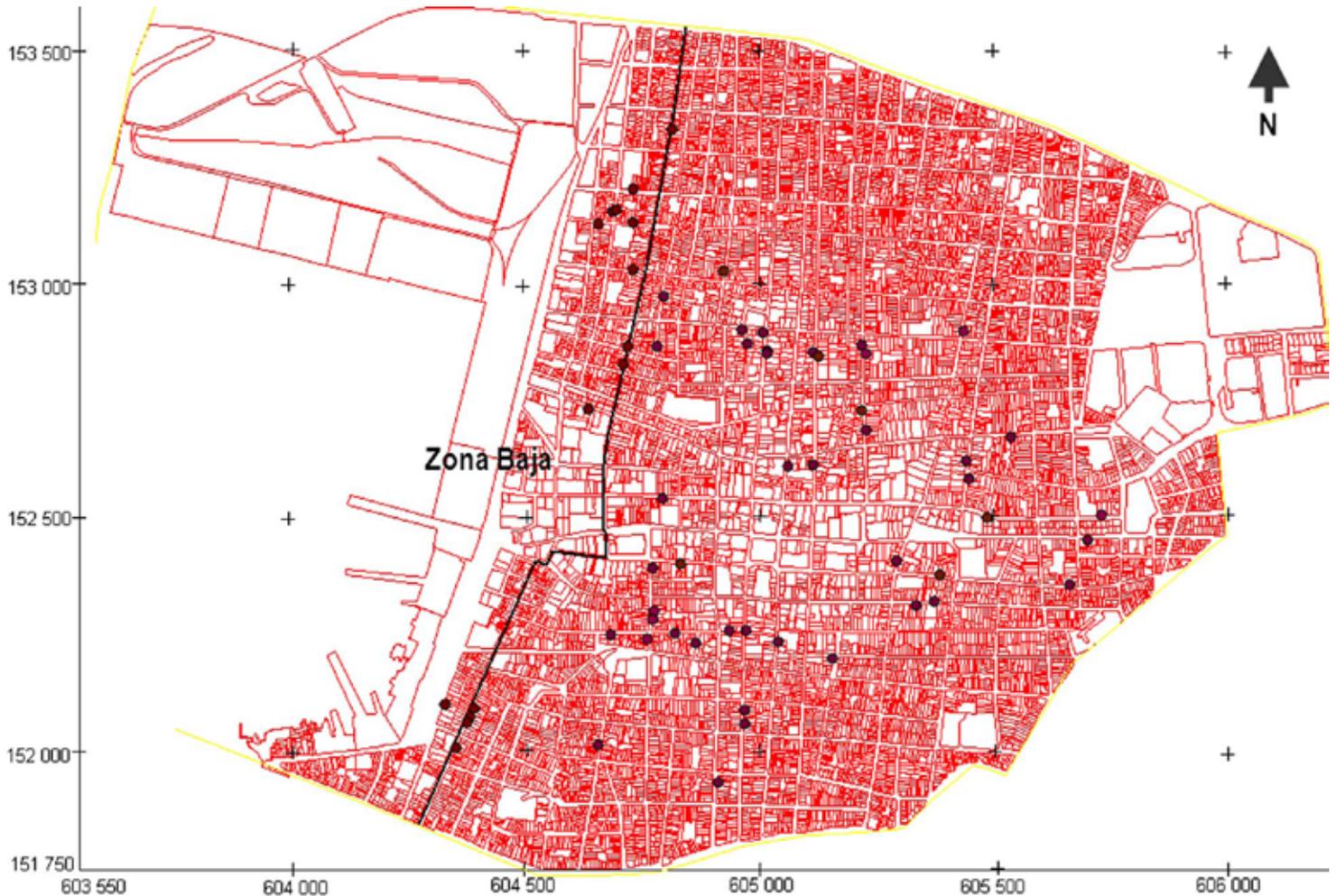


Figura 9. Ubicación geográfica de las edificaciones seleccionadas. Fuente: autores.

Época de construcción: solo se estudian edificaciones de la etapa colonial comprendida entre los siglos XVIII y XIX.

Contenido de sales en la fachada: esta variable puede ser significativa y afectar el principio de funcionamiento del higrómetro. Se analizó a través de la conductividad eléctrica, variable que permite determinar la presencia de sales y se siguió para su determinación el siguiente procedimiento:

Se tomó la muestra de material de la fachada, se trituró y se pesaron 3 g de material, los cuales se mezclaron en 20 ml de agua, para formar una solución. Al agua que se utilizó como disolvente se le midió la conductividad eléctrica y se utilizó como patrón (agua patrón), luego se midió la conductividad de cada solución y se compararon los valores con el valor del agua patrón, para determinar la influencia de las sales se aplicó el siguiente criterio [11]: “si la diferencia entre ambos valores es menor de 10 no hay contenidos significativos; y si es mayor de 15 existirán disposiciones importantes”.

En esta investigación se midió la conductividad eléctrica en muestras tomadas en cada fachada de 22 edificaciones en estudio y se utilizó el conductímetro tipo GLP 31, No. 2185752 (figura 10).

Contenido de humedad de la fachada: en esta variable se determinó con la técnica del higrómetro de contacto, que analiza el índice de humedad del material en función de la conductividad que presenta el elemento ensayado [2]. Como primer paso, el investigador definió el número de zonas donde se realizaron las mediciones, a partir de la presencia de manchas de humedad. Al



Figura 10. Conductímetro utilizado en las mediciones de conductividad eléctrica. Fuente: autores.

11. LOZANO MARTÍNEZ-LUENGAS, Alonso y LOZANO APOLLO, Gerónimo: “Equipos e instrumentos en el diagnóstico de las humedades”. *Artículos Bicce*. [en línea]. [Consulta: 20 de diciembre de 2012]. Disponible en: http://www.coaatmca.com/gcw_designer/documentos/110.080_LOZ%20EQUIPOS%20INSTRUMENTOS%20EN%20EL%20DIAGNOSTICO%20DE%20LAS%20HUMEDADES.pdf

medir se situó el higrómetro en la parte inferior del muro y se midió en cuatro puntos ubicados cada (0,50 m) dentro de la mancha de manera ascendente hasta los 2 m de altura (ver figura 11B). En las edificaciones con corredor elevado se incrementó el número de puntos de medición según la altura.

Se utilizó el higrómetro tipo Surveymaster No. 01 18282 (ver figura 11A), el cual combina el sistema de utilización superficial (modo de medición) con un emisor de radiofrecuencia (modo de búsqueda) y de esta forma permite el estudio de superficies húmedas bajo revestimientos.

Altura capilar: se tomó la altura medida desde el nivel de calle hasta donde se alcanza el valor del 20 % de contenido de humedad en la fachada (esto incluyó la altura del corredor elevado). Este valor de contenido de humedad, según plantea el manual del equipo de medición, se puede considerar como la humedad límite natural que puede alcanzar una fachada.

Grado de deterioro: para la caracterización de esta variable se analizó el documento vigente aplicado por el Instituto Nacional de la Vivienda [12] e investigaciones realizadas respecto a la temática [13]. En este análisis no se encontraron elementos que particularizarán el estado de deterioro producto de los efectos de la humedad por capilaridad. De aquí que en esta investigación se hace una propuesta, basada en estos documentos, donde se definen y proponen grados de deterioro a través de indicadores que reflejen las anomalías que afectan a una fachada bajo los efectos de la humedad por capilaridad. En este caso no se consideran los efectos a tracción (grietas y fisuras), ya que no son anomalías que no produce esta lesión.

Indicadores: porcentaje de área humedad, porcentaje de desconchado de la pintura, presencia de eflorescencias, desprendimientos del repello, presencia de erosiones y grietas.

Se establecen cuatro grados de deterioro:

Grado 1: presencia de menos del 50 % de área húmeda.

Grado 2: presencia de más del 50 % de área húmeda, desconchado de la pintura hasta un 50 % y eflorescencias.

Grado 3: presencia de más del 50 % de área húmeda, desconchado de la pintura más del 50 %, eflorescencias, desprendimiento del repello y presencia de erosiones menores del 20 %.

Grado 4: presencia de más del 50 % de área húmeda, desconchado de la pintura de más del 50 %, eflorescencias, desprendimiento del repello y presencia de erosiones por encima del 20 %.

Variables a tener en cuenta

Según diversos autores, tanto nacionales como internacionales [1], [3] y [7], se plantea que las variables dirección de las precipitaciones, temperatura, humedad relativa y dirección e incidencia de los vientos y la radiación solar, intervienen en el proceso de evaporación de la fachada, elemento que es muy importante en el comportamiento del fenómeno de humedad capilar. El grado de incidencia de estas variables depende de la orientación de la fachada, por lo que en este estudio se tuvieron en cuenta a través de la variable orientación geográfica de la fachada.

5to paso: Análisis estadístico

Se utilizó un software estadístico STATGRAPHICS para describir los datos medidos y el Microsoft Excel para determinar la interrelación de las variables.

Resultados y discusión

Mapa temático de suelo y modelos digitales de nivel freático y humedad

En la calibración del mapa temático y los modelos, se perforaron diez

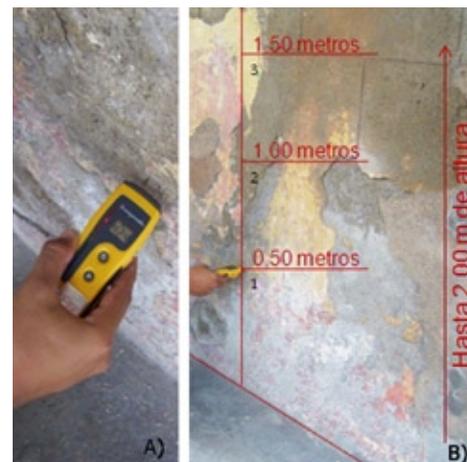


Figura 11. Fotos de: A) Equipo Surveymaster y B) Procedimiento de medición. Fuente: autores.

12. INSTITUTO NACIONAL DE LA VIVIENDA. "Procedimiento para determinar el estado técnico de la vivienda".

La Habana: Instituto Nacional de la Vivienda, 1990.

13. TEJERA GARÓFALO, Pedro: "Fichas de inspección". Curso de posgrado: Intervención en estructuras de hormigón. Análisis de los procedimientos clásicos de cálculo. Inspección de estructuras de hormigón armado. Cálculo de la resistencia residual. [Santiago de Cuba]: Universidad de Oriente-Cujae. 2012.

calas del tipo técnico-litológica hidrogeológica, con diámetro de 73 mm y profundidad entre 6,00-10,00 m, para un total de 93,30 m de perforación.

En las calas inicialmente se propuso una profundidad de 10,00 m, pero en cuatro calas no se pudo lograr por la complejidad geológica del terreno. Como resultado fundamental se comprobó, que los tipos de suelos coinciden con los planteados en el mapa temático.

Se monitoreó la profundidad del nivel freático en temporada de lluvia y seca. Se realizaron 27 mediciones por calas, efectuadas en un intervalo de 10-15 días, en función de las condiciones climáticas de la zona.

En el análisis estadístico de las mediciones de profundidad del nivel freático por cala, se obtuvo la media, la desviación típica y el intervalo de frecuencias, para una probabilidad del 95 %. Al describir estos resultados se concluyó que los valores siguen una distribución normal, con una variación promedio del nivel freático en la zona que oscila de (0,20-0,30) m.

Los ensayos de medición de humedad del suelo que se realizaron corroboraron los resultados planteados en el modelo digital. Donde predominaron valores de humedad entre 30 y 60 %. Estos valores se consideran elevados, manteniendo los suelos con humedades mucho mayores que la humedad óptima característica de los suelos finos. Si como se conoce, los suelos con la humedad óptima tienen alrededor del 85 % de saturación, es de suponer que la saturación a la que se encuentran en el área de estudio sea superior a dicho valor, favoreciendo de esta manera la presencia de humedad en las construcciones.

La combinación de estos tres factores crea un escenario natural que facilita enormemente la acción de la humedad capilar en las construcciones.

Levantamiento de la humedad por capilaridad

En la realización del levantamiento de las 82 edificaciones de muestreo, se obtuvo que solo 32 de las viviendas (el 39 % de la muestra), presentaban los síntomas de la lesión humedad por capilaridad, de las cuales se detectaron 19 de fachada simple y 13 de fachada corredor. Es importante aclarar que todas las viviendas afectadas por la lesión se encuentran ubicadas en la zona baja.

Al analizar la incidencia de la variable profundidad del nivel freático con respecto a la presencia de la lesión, se pudo comprobar que todas las viviendas ubicadas en áreas con profundidad del nivel freático entre 0- 3,00 m están afectadas, por lo que se concluye que la incidencia de la variable es efectiva en este rango de profundidad.

Contenido de sales en las fachadas de las edificaciones muestreadas

El análisis estadístico de las mediciones de conductividad eléctrica demostró que la muestra sigue una distribución normal con un coeficiente de variación de hasta un 1 %, para una probabilidad de un 95 % y se determinó el valor más probable de cada muestra.

El estudio de contenido de sales en las fachadas de las edificaciones analizadas, arrojó que la cantidad de sales encontradas no afectan los valores de lectura del higrómetro, ya que al comparar los resultados de conductividad eléctrica de las muestras tomadas en las fachadas con la del agua patrón, se comprobó que el 87,5 % cumplen con una diferencia menor de 10 y el 12,5 % con una diferencia menor de 13 (ver tabla 2).

Mediciones del contenido de humedad

Al graficar los valores del contenido de humedad (ver figura 12), se determinó que las fachadas más húmedas son las orientadas al norte. Para las mediciones se tuvo la precaución de no escoger las zonas de manchas cercanas a la unión entre viviendas, porque cuando llueve las filtraciones alteran los valores de humedad, como es el caso del lote ubicado en la calle Gallo No. 364 y 362 (ver figura 13). Es recomendable también realizar las mediciones del contenido de humedad para este tipo de lesión en el período seco.

Tabla 2. Resultados de la diferencia de conductividad eléctrica de las muestras y la del agua patrón.

Dirección	Muestra	Conductividad Promedio (mS/m)	Conductividad del agua (Patrón) (mS/m)	Diferencia entre el patrón y el valor promedio
Santa Rita, # 12	T-1	9,236	0,009	9,22696
Santa Rita, # 18	A-2	8,954	0,009	8,94496
Gallo No 109	I-1	5,854	0,009	5,84496
Gallo No 364 y 362	C-2	5,752	0,009	5,74296
Barracones, # 301	B-1	5,852	0,009	5,84296
Barracones, # 305	O-2	5,894	0,009	5,88496
Barracones, # 267	L-1	12,09	0,009	12,08096
Barracones, # 257	S-2	9,876	0,009	9,86696
Barracones, # 263	P-1	8,354	0,009	8,34496
Barracones, # 275	D-2	9,078	0,009	9,06896
Alameda, # 861D y 863	W-1	13,002	0,009	12,99296
Alameda, # 803	M-2	12,43	0,009	12,42096
San Gerónimo, # 62	K-1	6,032	0,009	6,02296
Barracones, # 167	O-2	5,964	0,009	5,95496
Habana, # 121	J-1	6,092	0,009	6,08296
Jobito, # 51	Q-2	6,008	0,009	5,99896
Maceo, # 111 y 113	Z-1	4,334	0,009	4,32496
Barracones, # 271	R-2	4,514	0,009	4,50496
Maceo, # 54	F-1	4,462	0,009	4,45296
Gral. A. Goulet, # 55	F-2	4,504	0,009	4,49496
Jobito, # 212 1/2	H-1	2,838	0,009	2,82896
Jobito 213	N-2	2,722	0,009	2,71296
San Mateo, # 103	U-1	4,604	0,009	4,59496
Padre callejas, # 151	X-2	4,984	0,009	4,97496

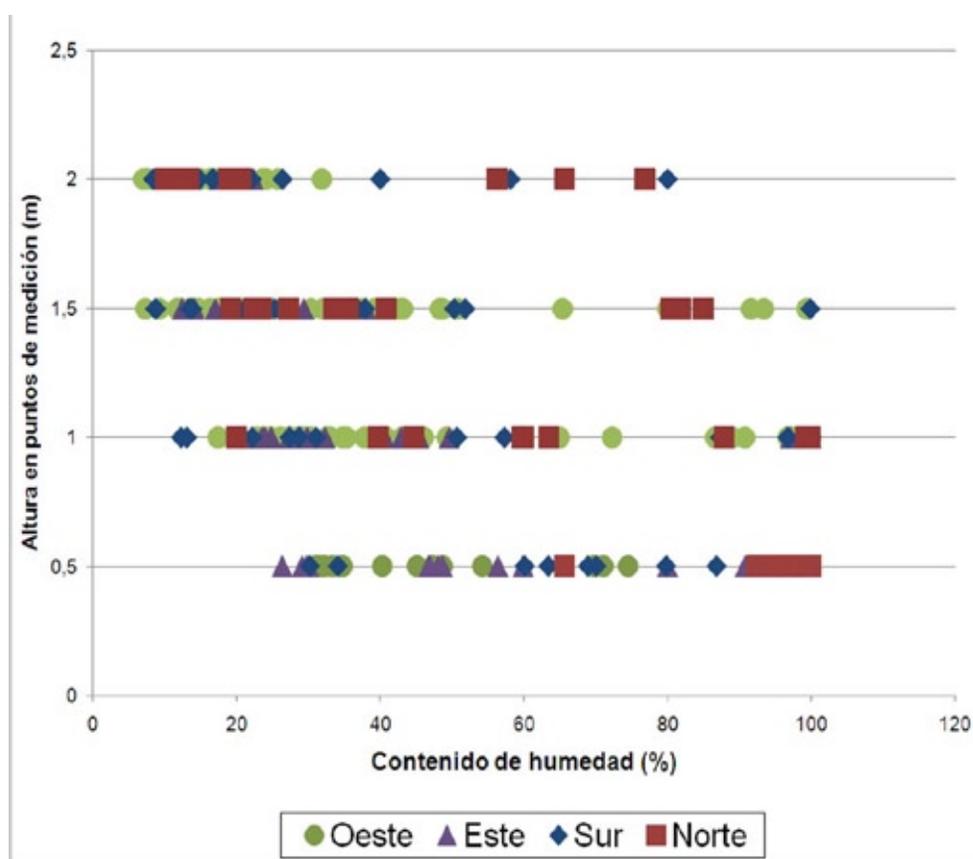


Figura 12. Gráfico con valores de contenido de la humedad en las fachadas según la orientación geográfica.

Altura capilar

La altura capilar en las viviendas afectadas oscilan de (1,33 hasta 3,12) m, obteniendo las mayores alturas de (2,30 hasta 3,12) m en las viviendas que tienen corredor elevado y que se encuentran ubicadas en suelos de arcilla muy plástica y con orientación de fachada al oeste.

Grado de deterioro

Esta variable arrojó que existen 6 viviendas con grado 3 (19 %) y las 26 restantes con grado 2 (81 %), encontrándose que las viviendas de mayor grado de deterioro son las que tienen fachadas orientadas al este.

Análisis de influencia de variables ambientales

Para el análisis de interacción de las variables ambientales, se tomaron como datos los valores obtenidos en las mediciones de las viviendas afectadas (ver tabla 3). Con estos datos, se confeccionaron gráficos de altura capilar en función de la profundidad del nivel freático y la humedad del suelo, considerando el tipo de suelo, el tipo modular de material de construcción y la orientación de la fachada.

Altura capilar según nivel freático, tipo de suelo y orientación de fachada

Al analizar la relación que existe entre la altura capilar y las variables nivel freático, tipo de suelo y orientación de fachada, se comprobó que cuando el nivel freático se encuentra hasta una profundidad de 3 m aporta valores de humedad importante a las viviendas, provocando valores de altura capilar por encima de 1,30 m. También se determinó que la altura capilar y el nivel freático siguen una tendencia lineal para un mismo tipo de suelo y orientación de fachada, lo que demuestra que existe una fuerte relación entre estas variables (figuras 14-17).

Además se pudo comprobar que la orientación de la fachada también influye en la altura capilar, siendo las fachadas orientadas al oeste y este donde se alcanzan los mayores valores de altura capilar, mientras que las fachadas orientadas al norte las más húmedas.

Tabla 3. Valores de las variables muestreadas.

No	Dirección	Tipo de material	Orientación geográfica	Altura del corredor (m)	Tipo de fachada	Área húmeda (%)	Nivel freático (m)	Altura capilar (m)	Humedad del suelo (%)	Tipo de suelo
1	Padre callejas, # 151	Ladrillo	Sur	0,00	Simple	86,00	0,93	1,72	31,81	Arcilla de baja plasticidad
2	Princesa, # 51	Ladrillo	Sur	1,40	Corredor (E)	52,67	2,14	2,45	30,82	Arcilla muy plástica
3	San Germán, # 7A	Ladrillo	Sur	0,60	Simple	40,75	0,91	1,42	32,12	Cieno arcilloso
4	Habana, # 121	Ladrillo	Sur	0,00	Corredor	75,00	2,48	1,50	19,3	Arena arcillosa
5	Maceo, # 111 y 113	Ladrillo	Sur	0,00	Simple	81,50	2,04	1,63	19,65	Arena arcillosa
6	San Mateo, # 103	Ladrillo	Sur	0,00	Simple	87,50	1,8	1,75	20,06	Arena arcillosa
7	Santa Rita, # 12	Ladrillo	Norte	0,00	Simple	97,00	1,06	1,94	24,64	Arcilla muy plástica
8	Santa Rita, # 18	Ladrillo	Norte	0,00	Simple	82,33	1,28	1,65	24,44	Arcilla muy plástica
9	Los Maceos, # 54	Ladrillo	Norte	0,00	Simple	98,33	1,61	1,97	21,45	Arena arcillosa
10	San Gerónimo, # 62	Ladrillo	Norte	0,00	Corredor	91,50	1,62	1,83	20,78	Arena arcillosa
11	Gral. A. Goulet, # 55	Ladrillo	Oeste	0,30	Simple	54,67	1,02	1,39	27,04	Arcilla de baja plasticidad
12	Alameda # 863	Mampuesto	Oeste	0,00	Corredor	80,00	1,69	1,60	29,78	Arcilla muy plástica
13	Alameda, # 803	Ladrillo	Oeste	0,15	Simple	95,25	0,74	2,06	25,38	Arcilla muy plástica
14	Jobito, # 51	Ladrillo	Oeste	0,38	Corredor	87,00	0,97	2,12	23,25	Arcilla de baja plasticidad
15	Jobito, # 213	Ladrillo	Oeste	0,45	Simple	87,33	1,69	2,20	20,46	Arena arcillosa
16	Gallo No 109	Ladrillo	Oeste	0,80	Corredor (E)	75,00	1,33	2,30	20,03	Marga
17	Barracones, # 301	Ladrillo	Oeste	0,74	Corredor (E)	87,83	2,11	2,50	30,91	Arcilla muy plástica
18	Barracones, # 275	Ladrillo	Oeste	1,10	Corredor (E)	67,17	2,11	2,44	30,86	Arcilla muy plástica
19	Barracones, # 271	Ladrillo	Oeste	1,46	Corredor (E)	63,50	2,09	2,73	30,51	Arcilla muy plástica
20	Barracones, # 267	Ladrillo	Oeste	1,32	Corredor (E)	82,25	2,03	2,97	29,80	Arcilla muy plástica
21	Barracones, # 257	Mampuesto	Oeste	1,50	Corredor (E)	50,00	1,78	2,50	26,82	Arcilla muy plástica
22	Barracones, # 263	Ladrillo	Oeste	1,30	Corredor (E)	90,83	1,94	3,12	28,68	Arcilla muy plástica
23	Barracones, # 305	Ladrillo	Oeste	1,20	Corredor (E)	75,00	2,12	2,70	30,37	Arcilla muy plástica
24	Barracones, # 167	Ladrillo	Oeste	0,12	Simple	82,25	1,44	1,77	22,1	Arcilla muy plástica
25	Barracones, # 5	Ladrillo	Oeste	0,30	Simple	70,25	1,96	1,71	27,33	Cieno arcilloso
26	Barracones, # 7	Ladrillo	Oeste	0,30	Simple	72,25	1,89	1,75	26,47	Cieno arcilloso
27	Jobito, # 212 1/2	Mampuesto	Este	0,46	Simple	67,75	1,67	1,82	20,66	Arena arcillosa
28	Peralejo, # 706	Ladrillo	Este	0,00	Simple	72,83	2,67	1,46	32,42	Cieno arcilloso
29	Gallo No 364 y 362	Ladrillo	Este	0,00	Simple	83,50	2,55	1,67	26,06	Arcilla
30	Barracones, # 166	Ladrillo	Este	0,00	Simple	66,25	1,26	1,33	21,76	Arcilla muy plástica
31	Barracones, # 162	Ladrillo	Este	0,00	Simple	70,75	1,21	1,42	21,3	Arcilla muy plástica
32	Barracones, # 6	Ladrillo	Este	0,20	Simple	74,50	1,95	1,69	29,35	Cieno arcilloso

Este comportamiento es explicable al analizar la incidencia de las variables temperatura y humedad relativa, que según datos históricos de la zona de estudio, presentan valores dignos de considerar, junto con la radiación solar y la velocidad y turbulencia de los vientos que inciden en estas edificaciones, ya que las fachadas orientadas al oeste y al este reciben mayor radiación, debido a la trayectoria solar para esta región del país. Como resultado, se produce una mayor temperatura en los materiales y en el agua capilar en esas fachadas, y por consiguiente disminuye la densidad, el peso específico y la viscosidad de esta agua, lo que provoca un aumento de la altura capilar (según ley de Jurín, ver ecuación 1)

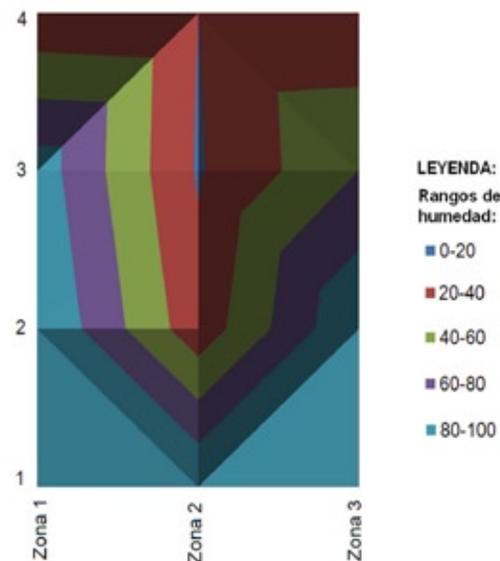


Figura 13. Distribución del contenido de humedad en la fachada del lote ubicado en la calle Gallo No. 364 y 362, según escala de colores.

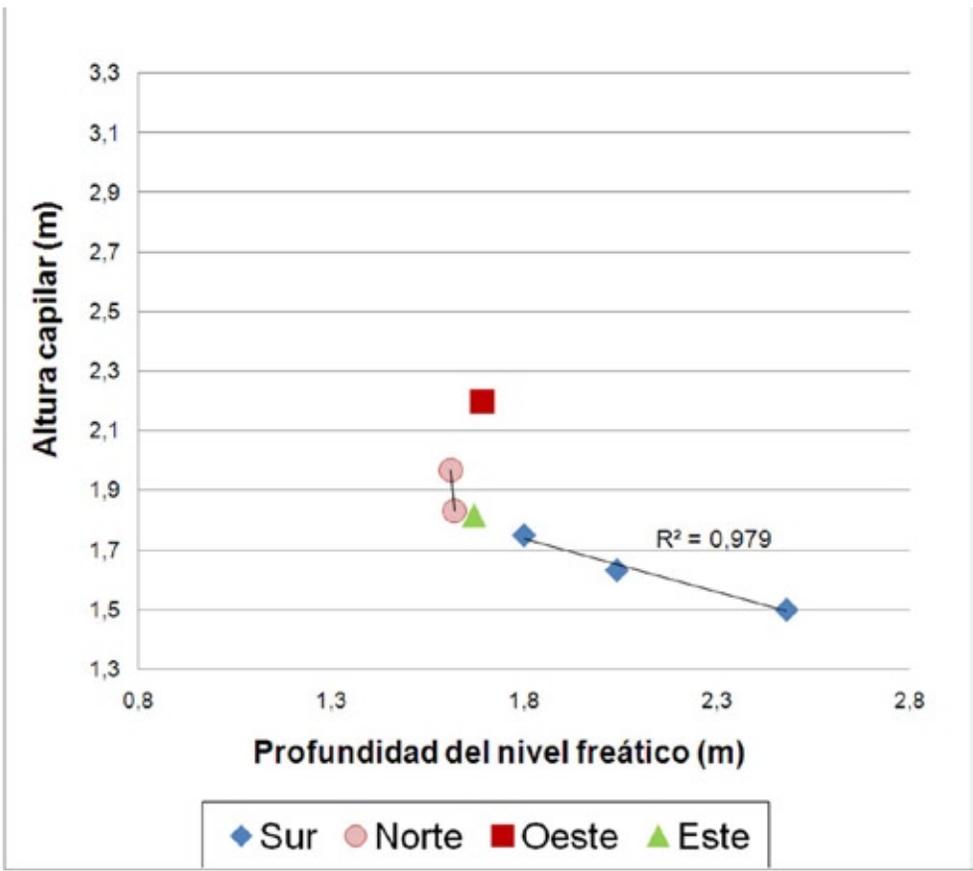


Figura 14. Tipo de suelo arena arcillosa.

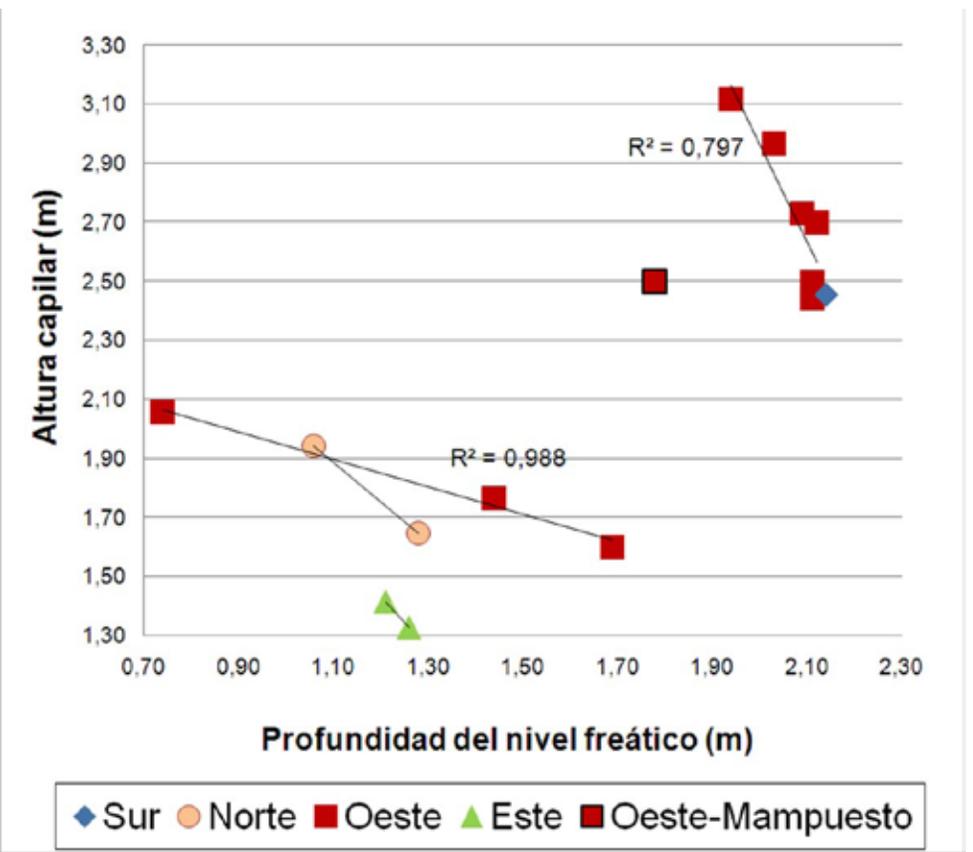


Figura 15. Tipo de suelo arcilla muy plástica.

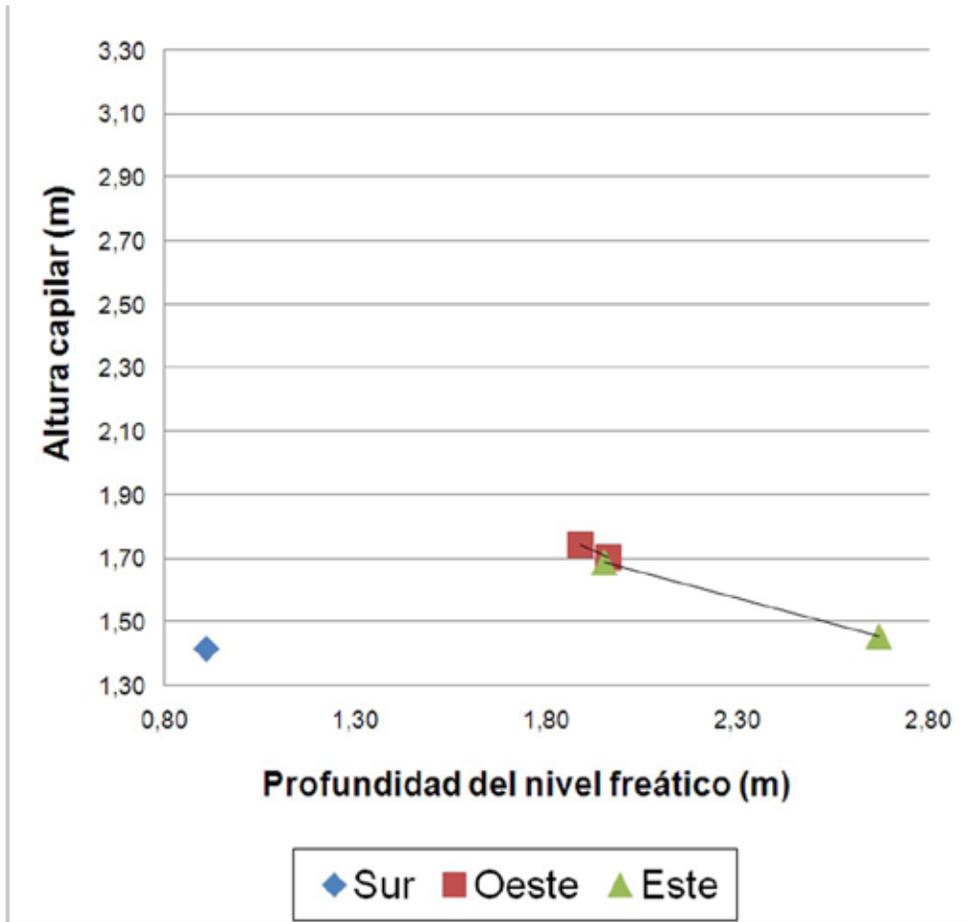


Figura 16. Tipo de suelo cieno arcilloso.

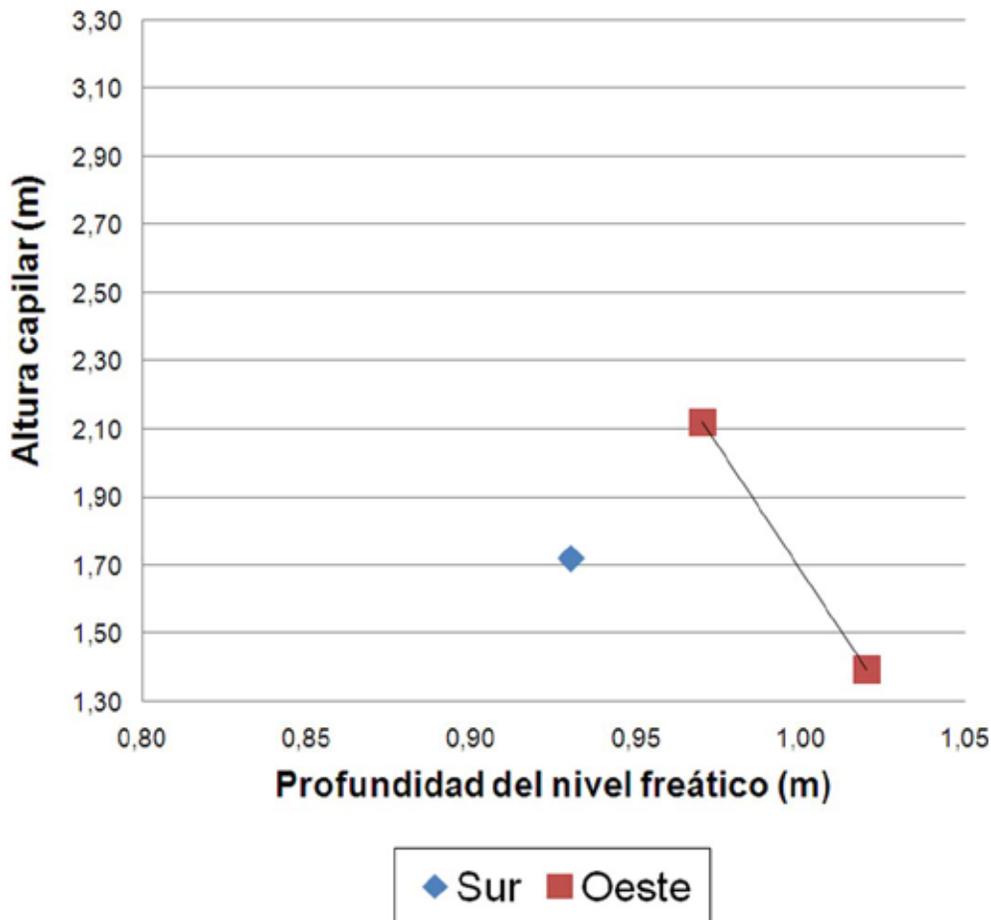


Figura 17. Tipo de suelo arcilla de baja plasticidad.

$$hc = 2 Ts \cos \alpha / \gamma_w r \quad (1)$$

donde:

hc : Altura capilar.

Ts : Tensión superficial.

γ_w : Peso específico del fluido.

r : Radio del capilar.

Además se debe considerar también que la dirección de los vientos ocurre del norte-noreste y sur-suroeste, permitiendo la circulación de pequeñas corrientes de aire en las calles orientadas en la dirección norte-sur, lo que implica que en las fachadas orientadas al oeste y este aumente la evaporación y disminuya el contenido de humedad. Lo anterior favorece que se produzca una mayor altura capilar, pero con menor contenido de humedad.

Altura capilar según la humedad del suelo

Como ya se mencionó, los suelos finos con elevada humedad debido a la influencia del nivel freático, son los que mayor humedad conservan. Se observa aquí que, los suelos que tiene mayor contenido de humedad son los más finos, pudiendo llegar a valores cercanos a la saturación. Los resultados se presentan en la figura 18.

De igual manera queda claro que independientemente del contenido de humedad del suelo encontrado, los valores de altura capilar y humedad en fachadas pueden ser elevados. Esto lleva a pensar que esta variable no manifiesta influencia decisiva en las afectaciones de las viviendas.

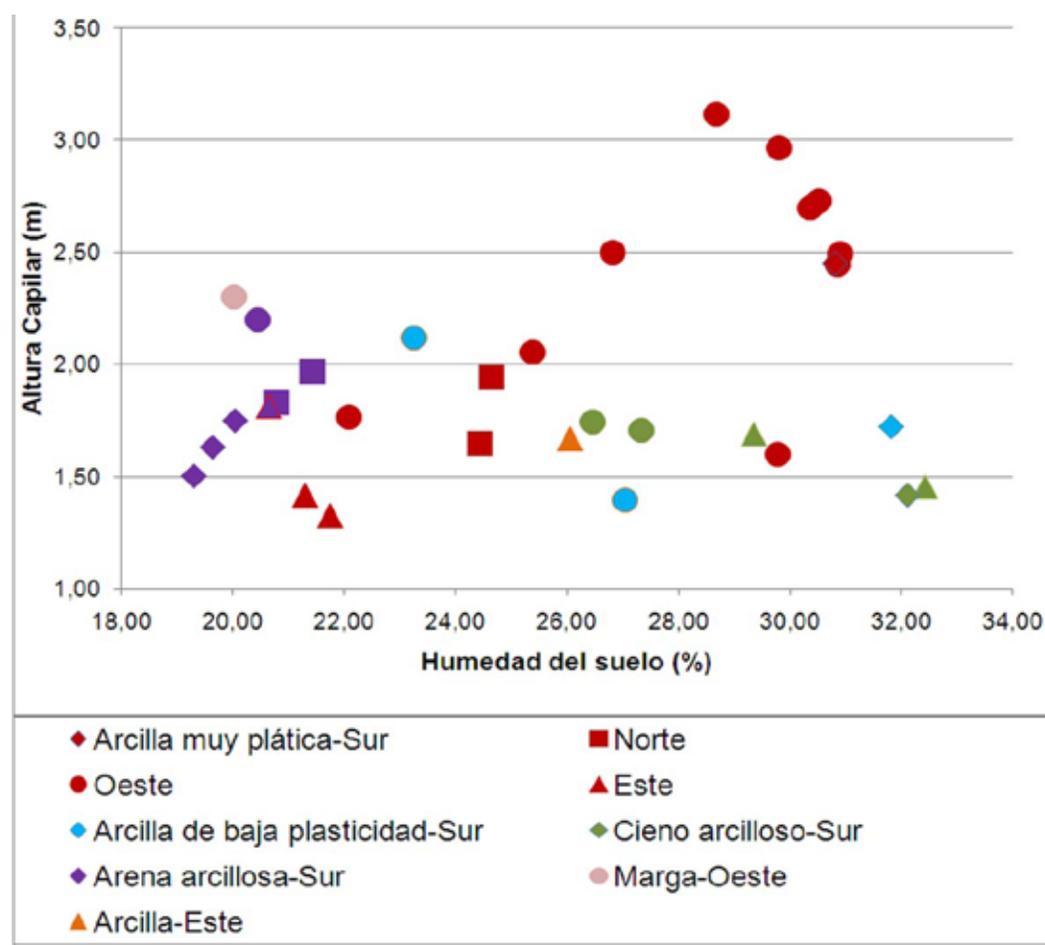


Figura 18: Gráfico que muestra la relación entre la altura capilar en fachadas y la humedad del suelo según el tipo de suelo.

Relación entre el grado de deterioro y la orientación de fachada

Otro resultado importante se obtuvo al analizar el grado de deterioro en relación con la altura capilar, donde se demuestra que no tienen una relación directa, ya que aquí incide otra variable como es la dirección de la lluvia, la cual acelera las lesiones de desprendimientos del repello, erosión y formación de grietas. En este caso las fachadas orientadas al este son las más afectadas con grado de deterioro 3, pues la dirección de la lluvia en esta zona es del norte-noreste, con predominio al noreste, lo que implica una incidencia directa en esta orientación de fachada (ver figura 19).

En las fachadas que no incide la lluvia directamente, como las orientadas al norte, oeste y sur, tienen un grado de deterioro menor (grado 2).

De este análisis de correlación se pudo determinar que la altura capilar en el caso de las edificaciones, no solo depende del radio del capilar, de la tensión superficial y del peso específico del agua, como plantea la ley de Jurín, sino que también depende, de las condiciones hidrogeológicas y ambientales del área, específicamente de las variables profundidad del nivel freático y la orientación de fachada, así como el tipo de fachada.

Esta investigación evidenció las ventajas de contar con una herramienta como la modelación en un sistema de información geográfica en el estudio de la relación capilaridad-deterioro, ya que permitió el estudio y monitoreo de las variables en espacio y tiempo, elementos que posibilitan en el estudio del deterioro, obtener los conocimientos idóneos para lograr una adecuada intervención del mismo.

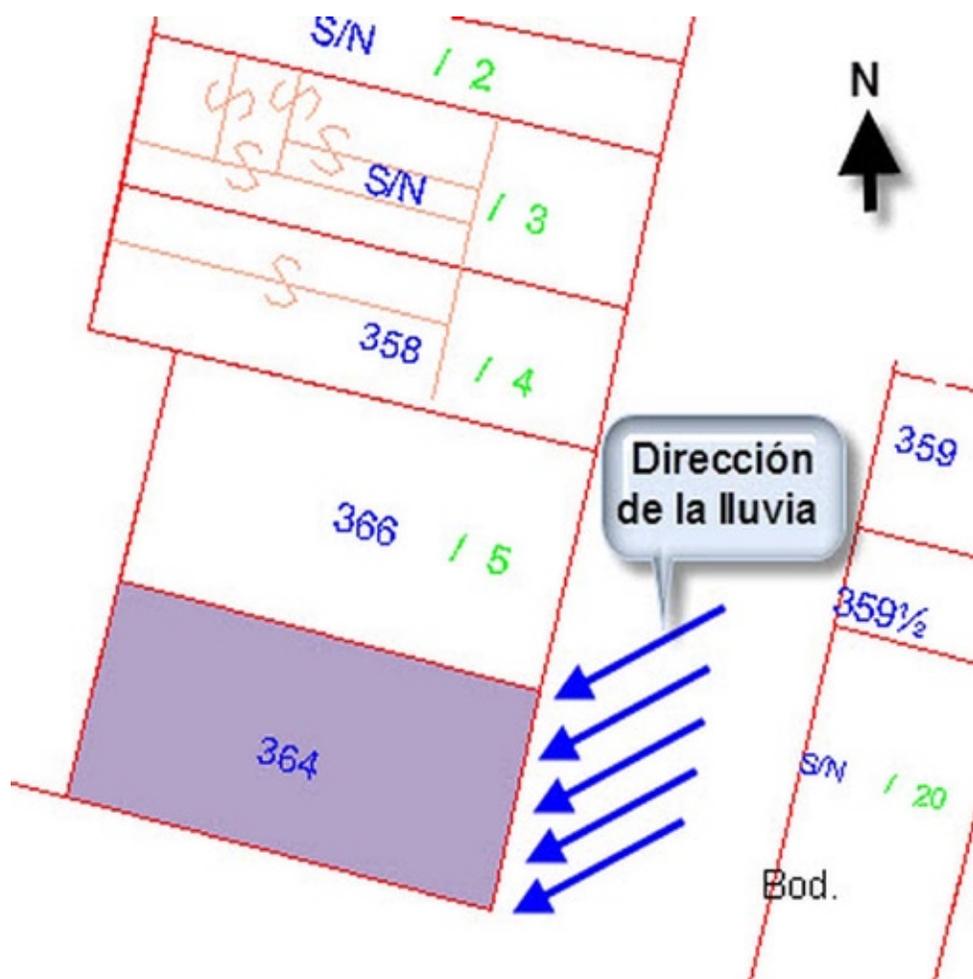


Figura 19: Esquema de la dirección de la lluvia en la zona del Centro Histórico santiaguero.

Conclusiones

1. Al aplicar los criterios de selección de la muestra, se obtuvo que la misma quedó conformada por 82 viviendas coloniales, lo que representa el 41,6 % del total de viviendas en la zona. De estas 45 (55 %) de fachada simple, 30 (37 %) de corredor y 7 (8 %) de balconaje.

2. En el análisis estadístico de las mediciones de profundidad del nivel freático por cala, para una probabilidad del 95 %, se demostró que los valores siguen una distribución normal, con una variación promedio del nivel freático en la zona que oscila de (0,20-0,30) m.

3. El levantamiento arrojó que de las 82 viviendas de muestreo, el 39 % (32) de las viviendas están afectadas por la lesión de humedad capilar. De estas el 59 % (19) son de fachada simple y 41 % (13) de fachada corredor. Las viviendas afectadas se encuentran ubicadas en la zona baja.

4. Para una altura de 0,5 m en la fachada, medida desde el nivel de piso, el contenido de humedad sobrepasa los valores del 20 % en el 100 % de las viviendas afectadas por la lesión, siendo la fachada orientada al norte la más humedad.

5. La altura capilar en las viviendas afectadas oscilan de (1,33-3,12) m, obteniendo las mayores alturas de (2,30-3,12) m en las viviendas que tienen corredor elevado y que se encuentran ubicadas en suelos de arcilla muy plástica y con orientación de fachada al oeste. Estos valores se incrementan con la profundidad del nivel freático en un rango de 0,2- 3 m, lo que indica la fuerte influencia de esta variable.

6. Del análisis de los resultados del grado de deterioro con respecto a la incidencia de las variables ambientales se concluye que existe una marcada incidencia de las variables profundidad del nivel freático y orientación de la fachada, dando como resultado que las fachadas afectadas por el fenómeno de humedad capilar, están expuestas a un mayor deterioro, cuando están bajo la acción desfavorable de estas variables ambientales, en este caso las fachadas orientadas al este.

7. En la relación capilaridad-deterioro en edificaciones, las variables que más influyen son la altura capilar, la profundidad del nivel freático, el tipo de suelo, el tipo y la orientación de la fachada, el tipo modular de material de construcción y el peso específico del agua.



Mayelin González Trujillo
Máster en Ciencia, Ingeniera. Profesora Auxiliar. Universidad de Oriente,
E-mail: mtrujillo@fco.uo.edu.cu



Eduardo Beira Fontaine
Profesor titular. Universidad de Oriente,
E-mail: efontain@fco.uo.edu.cu



Odalys Álvarez Rodríguez
Ingeniera Civil. Doctora en Ciencias. Profesora Titular. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría Cujae, Facultad de Civil.
E-mail: oar@civil.cujae.edu.cu



Elsi María López Arias
Ingeniera Hidráulica. Profesora. Departamento de Arquitectura. Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente.
E-mail: emlopez@fco.uo.edu.cu