



## Hacia un diseño arquitectónico repensado desde los diagramas de Voronoi

### Towards an architectural design rethought from Voronoi diagrams

Diego Marcelo Tipán-Renjifo

diegotipan@indoamerica.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4463-2013>

Universidad Tecnológica Indoamérica, Ecuador.

Heidi Guadalupe Tipán-Suárez

Heiditisu@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3772-7639>

Schlumberger, Empresa de Servicios Petroleros, Ecuador.

#### **Resumen**

Al diseñar es necesario impulsar, a través de la matemática, la inclusión de propuestas innovadoras para redefinir la concepción de la forma, el objetivo de este artículo es repensar el diseño arquitectónico desde los diagramas de Voronoi. La metodología fue cuasi experimental, la población los estudiantes de los primeros semestres de la facultad de arquitectura. Los resultados permitieron evidenciar que los estudiantes no conocían los diagramas y posterior al desarrollo del taller, terminan identificando la potencialidad de los diagramas de Voronoi. Se concluye que los diagramas de Voronoi deben integrarse en la formación de los futuros profesionales de la arquitectura.

**Palabras clave:** diseño, diseño arquitectónico, formación profesional superior, innovación pedagógica

#### **Abstract**

When designing it is necessary to promote through mathematics, the inclusion of innovative proposals to redefine the conception of form. The objective of this article is to rethink about architectural design from Voronoi diagrams. The methodology used was quasi experimental and as population chosen were chosen students of first terms from the Faculty of Architecture. The results showed that the students did not know the diagrams and after the development of the workshop, they ended up identifying the potential of the Voronoi diagrams. It is concluded that Voronoi diagrams should be integrated into the training of future architectural professionals.

**Keywords:** building design, design, higher professional training, pedagogical innovations



## **Introducción**

Los diagramas de Voronoi son un recurso que está al alcance de los estudiantes de arquitectura; la presente investigación propone el desarrollo de un cuasi experimento, para observar los resultados del curso de un taller sobre los diagramas y su influencia en las propuestas de diseño arquitectónico de los estudiantes de los primeros semestres de facultad. ¿Será posible repensar el diseño arquitectónico desde la implementación de los diagramas de Voronoi?

Georgy Voronoi, profesor de matemática ruso, en 1908 publicó su método de diagramas, este método de interpolación permite definir la cercanía entre puntos. Existen otros métodos, como la delimitación de polígonos que conducen a los mismos resultados, por lo que a veces se lo conoce como polígonos de Thiessen; los dos científicos trabajaron de forma independiente para llegar al mismo método. En la web se observa gran cantidad de trabajos acerca de los diagramas de Voronoi, habiéndose traducido a una gran cantidad de idiomas; entre las áreas de aplicación más populares, están la geometría computacional y los sistemas geográficos de información (Pokojski y Pokojska, 2018).

Los diagramas de Voronoi vienen desde la teoría de grafos; en el siglo 18 el problema de los puentes de Königsberg hizo que se inicie esta teoría. Euler al resolver el problema relaciona regiones, puntos y líneas. En un grafo los puntos se llaman vértices y las líneas aristas; como consecuencia se tiene la división de un espacio en distintas regiones. Los diagramas de Voronoi son un tipo de grafo que utiliza mediatrices, puntos y rectas para su representación, también se tiene la triangulación de Delaunay, que conforma una red de triángulos con ciertas características para las aristas y vértices del grafo (Soto y Castro, 2016).

La topología muestra sus avances en base a las aplicaciones de los diagramas de Voronoi, las llamadas mallas de Voronoi permiten analizar el movimiento en los puntos identificados de los fluidos, la forma de las mallas de un fluido en movimiento, cambian y se reconstruyen aplicando los diagramas de Voronoi, en este caso se aplican también las consideraciones de espacio tiempo al fluido que está a velocidad constante (Gaburro et al., 2020). En el análisis de los planos y las regiones del diagrama de Voronoi, se puede calcular u optimizar combinándolo con los algoritmos adecuados (Gawrychowski et al., 2021).



La población de estudio son 64 estudiantes de la Facultad de Arquitectura que cursan los primeros semestres en la Universidad Tecnológica Indoamérica de la ciudad de Quito-Ecuador, un 42 % son mujeres y 58 % son hombres; el 33% provienen de colegios fiscales, 20% fiscomisional y 47% particulares. Un 75 % tiene el bachillerato general unificado, el 13 %, bachillerato internacional y el 5% bachillerato técnico; la edad del 78% está entre 17 y 22 años, un 17 % tiene entre 23 y 25 años

La investigación es del tipo mixto como lo señalan Hernández y Torres (2018), es posible aplicar procesos cualitativos y cuantitativos sistemáticos, empíricos y críticos, donde se recolectan datos empíricos y cualitativos, es posible realizar inferencias y permiten una visión integral del fenómeno de estudio.

La investigación fue bibliográfica y documental, el estudio consta de tres fases, la primera es el diagnóstico del nivel de conocimiento de los diagramas de Voronoi, el segundo el desarrollo de tres talleres sobre la introducción, aplicaciones y creación de diagramas de Voronoi, y la tercera etapa es la evaluación de salida respecto del grado de avance, percepción y aplicación de los diagramas de Voronoi, luego de desarrollados los talleres, no existe grupo de control y se aplicó a todo la población de estudiantes.

La metodología es cuasi experimental, según Hernández y Torres (2018), se manipulan variables con el fin de observar el efecto resultante, los participantes fueron seleccionados directamente, sin selección al azar, son los denominados grupos “intactos”, el procedimiento fue: la selección del diseño arquitectónico y los diagramas de Voronoi como variables de estudio, se desarrolló el instrumento de diagnóstico y salida del taller; se trabajó con toda la población de estudiantes; se efectuó una inducción respecto del rol a cumplir durante la intervención, existió una motivación inicial para el involucramiento en la propuesta y al tener que entregar un producto del taller que contribuye a su promedio del semestre y se les aplicó pre pruebas (diagnóstico), al ser los talleres virtuales existió la posibilidad de grabar las sesiones de los talleres, además se desarrolló la planificación así como, la selección de los materiales y recursos para el taller.



La técnica aplicada fue la encuesta y el instrumento el cuestionario, la escala seleccionada es la Likert: donde 1 es totalmente en desacuerdo, 2 es en desacuerdo, 3 ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4 de acuerdo y 5 totalmente de acuerdo

La validación del instrumento se efectuó por tres expertos, con nivel de maestría y con experticia en las áreas de investigación, arquitectura, lenguaje y comunicación, las observaciones de los expertos fueron incluidas en el documento final para su posterior aplicación.

La confiabilidad del instrumento se determinó mediante el Alfa de Cronbach, aplicando el software SPSS ®, para el caso del diagnóstico, el resultado obtenido fue de 0,953, valor que permite afirmar que el instrumento posee una consistencia interna fuerte; para el caso de la culminación de los talleres sobre diagramas de Voronoi, el resultado obtenido fue de un Alfa de Cronbach de: 0,966, valor que permite asegurar una consistencia interna fuerte del instrumento de salida.

## **Desarrollo**

### *Elaboración y aplicaciones de diagramas de Voronoi*

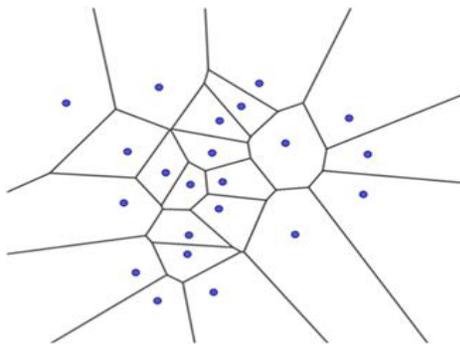
Al tener una superficie cualquiera y puntos sobre ella, es posible construir regiones, donde a cada una se le asigna un punto; toda la región estará más cerca de ese punto. Esta construcción geométrica, está en función del número de puntos existentes, que determinan la cantidad de regiones obtenidas luego de trazar la mediatriz de cada par de puntos, al aumentar la cantidad de puntos, también a la complicación del trazo; por esto existen varios algoritmos para optimizar la creación del diagrama, por ejemplo: “Divide y vencerás”, “Fuerza bruta” o “Fortune”. De todos los mencionados el algoritmo “divide y vencerás” es el de más fácil realización para los estudiantes; el procedimiento inicia, con una nube de puntos, el plano se divide en dos partes iguales, luego se trazan las mediatrices para cada par de puntos, del lado izquierdo y del lado derecho; se elimina la línea de separación iniciándose desde arriba hacia abajo. De acuerdo a los puntos que se vayan localizando, hay que recordar eliminar las líneas que no son necesarias (Ortega, 2020).



Como se observa en la figura 1, los diagramas de Voronoi tienen múltiples aplicaciones, en el caso del ejemplo, se elaboró el diagrama de Voronoi sobre el mapa del Ecuador, donde se identificó la ubicación geográfica de cada una de las capitales de provincia; para el caso de trabajos de ingeniería, en un modelado de la red de distribución de agua, por ejemplo, con el fin de optimizar la cantidad de agua disponible y que el agua llegue a todos los poblados y puedan contar con el líquido vital. Esto permite ahorrar presupuesto y mejorar la planificación, diseño y gestión de la infraestructura; en este caso para los pueblos del África meridional, una de las técnicas aplicadas en conjunto con otros programas, son los diagramas de Voronoi, determinando las zonas para el regadío (Muller et al., 2020).

### **Figura 1.**

*Diagrama de Voronoi de las capitales del Ecuador*



Fuente: elaboración propia.

La simulación de dinámica molecular combina algunas técnicas entre las cuales destacan los poliedros de Voronoi que permiten analizar estructuras nanométricas de aleaciones, el estudio de estos materiales tiene aplicación en la industria, a consecuencia de las aleaciones es posible la mejora de la resistencia mecánica (Sanches et al., 2019).

*Google maps* permite la ubicación de direcciones y muestra la ruta óptima de desplazamiento, mediante algoritmos de búsqueda, es posible desarrollar aplicaciones en base a *maps*, para optimizar la localización así como mejorar la calidad de los resultados; con base a los diagramas de Voronoi se propone una aplicación que utiliza un algoritmo para la búsqueda y que permite



seleccionar sitios de interés entre los identificados y considerar más de una ubicación y lugar (Annisa y Angraeni, 2021).

La mortalidad infantil y los datos que se obtienen a partir de su estudio, conforman la información denominada vital. La información sobre los nacimientos y defunciones permite aplicar los polígonos de Voronoi, mediante un análisis espacial y así minimizar los inconvenientes relacionados con la cercanía a los centros de atención municipal; además de combinarse con técnicas geoestadísticas, se logra mejorar el manejo de la información y la planificación de actividades para minimizar la mortalidad infantil (Rodrigues et al., 2014).

Los diagramas de Voronoi, presentan innumerables aplicaciones, entre las que destacan la construcción de algoritmos eficientes de optimización de distancias, por ejemplo, en el sector de las franquicias empresariales, se lo utiliza para determinar distancias óptimas para la entrega de los productos que comercializan estas organizaciones a través de su red de locales (Mumm, 2004).

### *Matemática y Voronoi*

La formación profesional de los arquitectos visibilizada a través de sus planes y programas de estudio desde el espacio de la matemática, propone una formación socio humanista de los arquitectos, con el fin de resolver los problemas de su profesión; desde el estudio y análisis de las experiencias como, la utilidad de la matemática con su aporte a la identificación, interpretación y análisis de los variados modelos matemáticos y su vinculación con la profesión, también se destaca la perspectiva formativa, orientada hacia la formación del pensamiento lógico y el desarrollo de la comprensión así como la interiorización de metodologías basadas en procesos algorítmicos para orientar una adecuada toma de decisiones (Crespo, 2016). En la misma línea de razonamiento de lo expuesto anteriormente los diagramas de Voronoi, permiten aportar desde la matemática a una formación integral, sistémica profesional del arquitecto.

Los diagramas de Voronoi, llamados también polígonos de Thiessen, son una de las principales aplicaciones a la geometría computacional, donde se obtiene una visión del plano euclídeo como región geográfica. En este mismo sentido, existe una propuesta de modelo de geometría urbana llamada la taxi geometría (taxicab), donde las distancias no se corresponden con las distancias



euclídeas y se las conoce como distancia Manhattan o taxi distancia y es el camino mínimo a través de las calles de la cuadrícula que se forma con las manzanas en un sector urbano; entonces la distancia más corta entre dos puntos, no es la línea recta que los une. En la taxicab la distancia mínima, es el camino que se recorre por las calles, en la llamada ruta óptima de un punto a otro; las mediatrices en la taxicab se obtienen mediante una poligonal que divide al plano de la región Voronoi mediante la aplicación de un modelo matemático. La aplicación de esta geometría combinada con los diagramas de Voronoi se da en la planificación urbana, donde además por ejemplo, se puede definir de la ubicación de sitios de interés (Urgellés, 2019).

La geometría computacional hace progresos importantes, los diagramas de Voronoi se implementan para el análisis de estructuras tridimensionales moleculares de proteínas; una red neuronal puede ser construida sobre la teselación de Voronoi, el modelo denominado VoroCNN, predice de forma adecuada las estructuras de proteínas (Igashov et al., 2021).

Las aplicaciones estructurales en el contexto de los diagramas de Voronoi, para la amortiguación de impactos, se efectúa pruebas mecánicas de compresión para estructuras presentes en la naturaleza, destaca la estructura Voronoi, por su capacidad de mayor amortiguación y resistencia a las pruebas de impacto, la comparación de las estructuras de ensayo son para distintas representaciones geométricas como patrones cuadrangulares y circulares, siendo la estructura tipo Voronoi, la que mejores y mayores valores de resistencia presenta (Agudelo et al., 2015).

El escutoide (escudero) como construcción geométrica similar a los prismas, se halla presente en las células y tejidos (células epiteliales), está formado por una serie de secciones poligonales, este objeto de aplicación en la biología molecular, se puede modelar en base a los diagramas de Voronoi (Aguilar et al., 2018).

La robótica es una de los campos de aplicación de los diagramas de Voronoi, en la exploración con autonomía y en red de varios vehículos, se da en combinación con técnicas de búsqueda y algoritmos que prevengan las colisiones. El objetivo de todo el conjunto de programas y las particiones dinámicas de Voronoi, es permitir minimizar los costos, mayor velocidad de aprendizaje, detección de averías y mapeos, la arquitectura utilizada es de control jerárquico; la implementación de Voronoi permite minimizar zonas de búsqueda y optimizar el trabajo de todos



los robots en su conjunto, para evitar rastreos duplicados y mejorar el resultado y eficiencia de cada robot (Hu et al., 2020).

### *Diseño arquitectónico y diagramas de Voronoi*

El diseño arquitectónico tiene en su interior lo abstracto y subjetivo; el concepto de diseño es una guía estética funcional y adaptada al contexto, la generación de espacios con sentido y razón se sustentan en la reflexión de la realidad, donde fluyen la percepción y la sensibilidad, alrededor de preguntas directrices al momento de diseñar, como la búsqueda de la inspiración y la representación, la significación, la funcionalidad, su trascendencia, sus espacios, la esencia de lo presente y de lo posterior. Desde la concepción de Vitruvio de firmeza, utilidad y belleza, se puede interpretar las ideologías y avances en la arquitectura, el arquitecto tiene que ser el mismo, mostrar su esencia y debe innovar; las críticas debe aceptarlas y seguir en su esencia (Cabas, 2021).

La didáctica de la arquitectura debe repensarse, las características del estudiante de hoy, son distintas a las del pasado, el tiempo parecería correr más rápido y es complicado integrar los saberes; las políticas universitarias tienen mucho que ver, además de los objetivos propuestos y el escenario de transformaciones complejas del espacio habitable, la formación del arquitecto debe enmarcarse en los cambios y avances de la tecnología, lo cultural y social siempre intervendrán (Fuentealba et al., 2019).

El encierro social tuvo muchas repercusiones, entre ellas el repensar las formas en las que se dan las interacciones sociales, la arquitectura pasa al frente, mediante la propuesta de espacios prácticos y al mismo tiempo eficientes y sencillos, las formas de las fachadas pueden resultar en la aplicación de imágenes monumentales, a la vez que pintorescas (Edificio Caracol; Barcelona, España, 2021).

La inspiración en las formas naturales, como los diagramas de Voronoi, ha hecho que la arquitectura actual, en base a los modelos matemáticos y los programas informáticos, pueda incluirlos, como parte de propuestas contemporáneas; el problema de la división del espacio hace que se recurra a las estructuras Voronoi y a la geometría computacional, el urbanismo utiliza hoy las teselaciones de Voronoi (Nowak, 2015).



La naturaleza interviene en el diseño arquitectónico a través de los diagramas de Voronoi. En la naturaleza abundan los ejemplos sobre animales y estructuras; la arquitectura orgánica, luego de pasar por la fase del análisis del espacio y en combinación con los modelos matemáticos, generan parametrización, sobre todo en el diseño de las fachadas; el diagrama de Voronoi permite innovar, para diversos y múltiples tipos de diseño arquitectónico (Sahin y Hatipoğlu, 2017).

Desde la arquitectura biodigital, se diseñan proyectos basados en los diagramas de Voronoi, donde se obtienen las denominadas estructuras de Voronoi biológicas, que incluyen atractores y campos de fuerza; los patrones Voronoi permiten organizar el territorio y el recorrido, también se incluyen los fractales de Voronoi, que permiten propuestas proyectuales variadas, desarrolladas en sistemas de cómputo, tomando como base las fotografías microscópicas (Estévez, 2016).

La autoorganización presente en los organismos vivos que se conciben como sistemas complejos, se entiende como un fenómeno de origen natural y que se pueden trasladar a la arquitectura, donde los diseños no cambien con el tiempo, que inspiren y que no sean posibles de imitar; es posible gracias a los diagramas de Voronoi llevar esta autoorganización de los seres vivos, con la implementación de la tecnología a los proyectos arquitectónicos (Asghar et al., 2020).

### *Desarrollo de talleres*

Los talleres implementados para los estudiantes de arquitectura sobre los diagramas de Voronoi, se detallan en la tabla 1.

**Tabla 1**

#### *Talleres de diagramas de Voronoi*

No	Taller	Contenido	Observación
1	Introducción a los diagramas de Voronoi	Reseña histórica de Definición Ejemplificaciones de	Se efectúa una evaluación de entrada para identificar el grado de conocimiento de los diagramas de Voronoi y la caracterización de los



			los diagramas de participantes.		
			Voronoi en diversas áreas del conocimiento		
2	Proceso de construcción de los diagramas de Voronoi	de	Métodos de construcción en Ambientación geogebra Divide y vencerás Creación de diagramas de Voronoi	de	Se selecciona el método del diagrama de Voronoi: “Divide y vencerás”. Se respalda el proceso con la aplicación del programa gratuito geogebra.
3	Diseño de un diagrama de Voronoi aplicación arquitectura	de	un Determinación de área con implementación en Desarrollo de propuesta	del	Definida la temática de implementación de la propuesta, el estudiante genera su diagrama de Voronoi. Bajo la técnica de la encuesta se implementa un instrumento de investigación de salida. sobre el resultado del desarrollo del taller sobre los diagramas de Voronoi.

Fuente: Los investigadores (2021)

En el inicio del proceso se aplicó la encuesta para identificar el grado de conocimiento de los diagramas de Voronoi y las bases geométricas, además de la percepción general de la arquitectura y los diagramas de Voronoi



*Encuesta ex ante*

**Tabla 2**

*Resultados encuesta ex ante*

No	Preguntas	Número de estudiantes
1	Los estudiantes no identifican ninguna aplicación de Voronoi ni pueden elaborar un diagrama;	52
2	Conoce lo que es un triángulo y una mediatriz, así como tiene los conocimientos básicos de la geometría,	63
3	Manifiestan que la arquitectura debe utilizar principios geométricos que no sean tan conocidos;	55
4	Considera que la naturaleza debe ser considerada en los diseños innovadores	64
5	Señala que la arquitectura debe promover la aplicación de los diagramas de Voronoi.	51
6	El 86% no puede identificar uno de los métodos de construcción de los diagramas;	55
7	No identifica una aplicación de Voronoi.	54

El 81% de los estudiantes no identifican ninguna aplicación de Voronoi ni pueden elaborar un diagrama; el 98% conoce lo que es un triángulo y una mediatriz, así como tiene los conocimientos básicos de la geometría, un 86 % manifiesta que la arquitectura debe utilizar principios geométricos que no sean tan conocidos; el 100% considera que la naturaleza debe ser considerada en los diseños innovadores; el 80% señala que la arquitectura debe promover la



aplicación de los diagramas de Voronoi. El 86% no puede identificar uno de los métodos de construcción de los diagramas; el 84% no identifica una aplicación de Voronoi.

*Encuesta ex post*

**Tabla 2**

*Resultados encuesta ex ante*

<b>N</b>	<b>Preguntas</b>	<b>Número de estudiantes</b>
1	Los estudiantes manifiestan que conocen ya, a Georgy Voronoi	52
2	Afirma saber que es un diagrama de Voronoi,	61
3	El 98% identifica alguna aplicación de diagramas de Voronoi en la arquitectura;	63
4	Un 95% puede elaborar un diagrama de Voronoi;	61
5	El 91 % considera que la arquitectura urbanística debe promover la aplicación de los diagramas de Voronoi;	58
6	El 70% conoce los métodos de construcción del diagrama	45
7	El 89% puede identificar una aplicación de los diagramas de Voronoi.	57

El 82 % de los estudiantes manifiesta que conoce ya, a Georgy Voronoi; el 96 % afirma saber que es un diagrama de voronoi, el 98% identifica alguna aplicación de diagramas de voronoi en la arquitectura; un 95% puede elaborar un diagrama de voronoi; el 91 % considera que la arquitectura urbanística debe promover la aplicación de los diagramas de voronoi; el 70% conoce



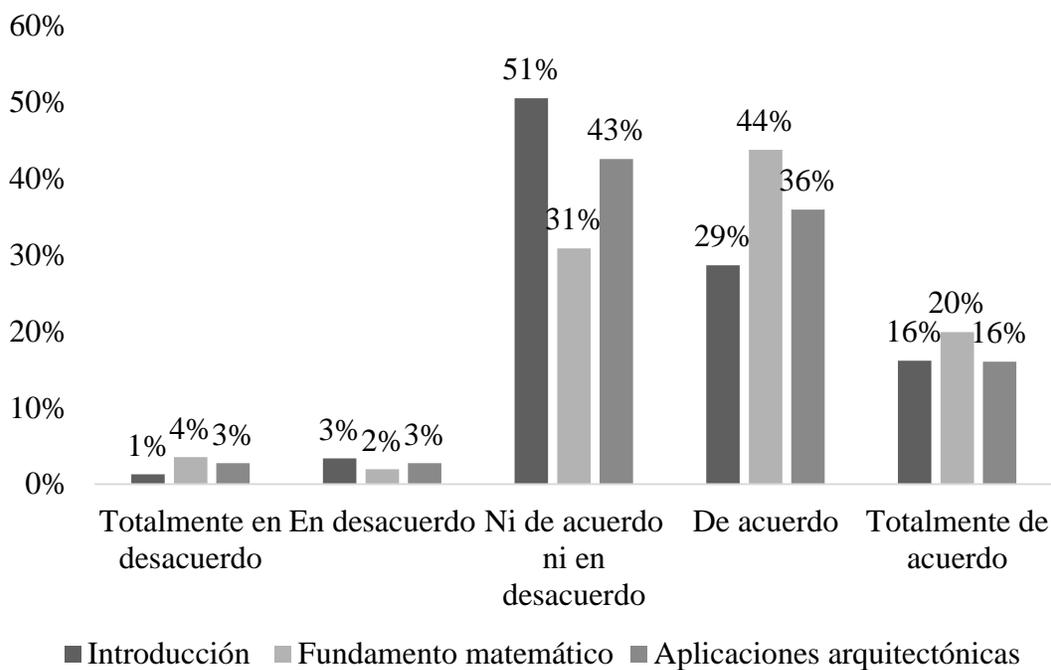
los métodos de construcción del diagrama y el 89% puede identificar una aplicación de los diagramas de voronoi.

Con el fin de definir los dominios de análisis, el instrumento de investigación, está elaborado en base a tres dominios: la conceptualización, el componente matemático y el arquitectónico.

### *Estudio diagnóstico*

### **Figura 2.**

#### *Resultados de la encuesta de diagnóstico*



Fuente: Los investigadores (2021)

#### *Componente de introducción a los diagramas de Voronoi*

En relación con el gráfico 1, de los estudiantes encuestados se observa que el 45 % está de acuerdo con que los diagramas de Voronoi, son un conjunto de regiones que permiten determinar



la proximidad entre puntos, además de que los diagramas de Voronoi junto con la computación, redefinen y potencian los diseños arquitectónicos, también que, si para la elaboración de un diagrama de Voronoi, es necesario únicamente definiciones básicas de la geometría plana, como triángulo y mediatriz; además que los diagramas de Voronoi se los puede apreciar en los cuerpos de algunos seres vivos; de igual manera que el concepto de cercanía en una zona determinada se redefine, al aplicar los diagramas de Voronoi y finalmente con que algunos de los problemas de ubicación y cercanía de sitios de interés se pueden solucionar mediante los diagramas de Voronoi.

#### Componente de fundamento matemático de los diagramas de Voronoi

A partir del gráfico 1, el 64 % está de acuerdo con que la matemática tiene una motivación adicional al trabajar con los diagramas de Voronoi, así como la ciencia matemática combinada con la tecnología proveen un soporte importante al arquitecto, que implemente estructuras, diseños e intervenciones urbanísticas en un contexto geográfico determinado; también que la geometría básica aporta de forma determinante al desarrollo de las innovaciones arquitectónicas y finalmente que la naturaleza y la matemática, a través de los diagramas de Voronoi, brindan una alternativa distinta para su implementación en la arquitectura.

#### Componente de las aplicaciones arquitectónicas de los diagramas de Voronoi

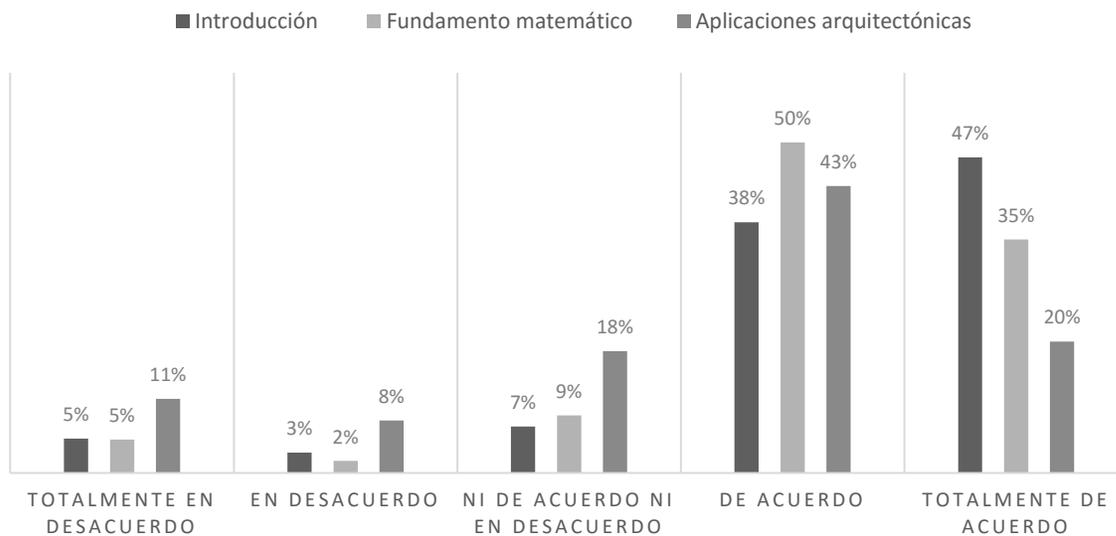
En referencia al gráfico 1, el 52 % de los participantes está de acuerdo con que la arquitectura en sus diseños básicos utiliza de forma mayoritaria figuras que son cuadrados, rectángulos o triángulos y que los diagramas de Voronoi se deben implementar como una opción válida en los diseños arquitectónicos; también que los diagramas de Voronoi deben ser parte del desarrollo de los contenidos de la carrera de arquitectura y que los diagramas de Voronoi presentan una alternativa válida para los arquitectos desde el enfoque del análisis de resistencia estructural además que los diagramas de Voronoi se aplican de forma exclusiva en la arquitectura y que los diagramas de Voronoi sirven para pensar un diseño arquitectónico desde algo que aún no se construye y que la aplicación de Voronoi aporta otra perspectiva de análisis en la rama del urbanismo arquitectónico y que el diagrama de Voronoi es una importante herramienta representacional para los arquitectos



## Estudio integral del desarrollo del taller de diagramas de Voronoi

### Figura 3.

#### *Resultados de la encuesta de salida*



Fuente: elaboración propia.

#### Componente del taller: 1. Introducción a los diagramas de Voronoi

En relación con el gráfico 2, de los estudiantes encuestados se observa que el 85 % está de acuerdo con que los diagramas de Voronoi, permiten analizar y redefinir aspectos como regiones de proximidad; la redefinición y repotenciación del trabajo en conjunto con la computación para los diseños arquitectónicos, también que es necesario solamente las definiciones básicas de la geometría plana, como triángulo y mediatriz; además que se los puede apreciar en los cuerpos de algunos seres vivos y finalmente con que resuelve algunos de los problemas de ubicación y cercanía de sitios de interés se pueden solucionar mediante los diagramas de Voronoi.

#### Componente del taller: 2. Fundamento matemático de los diagramas de Voronoi

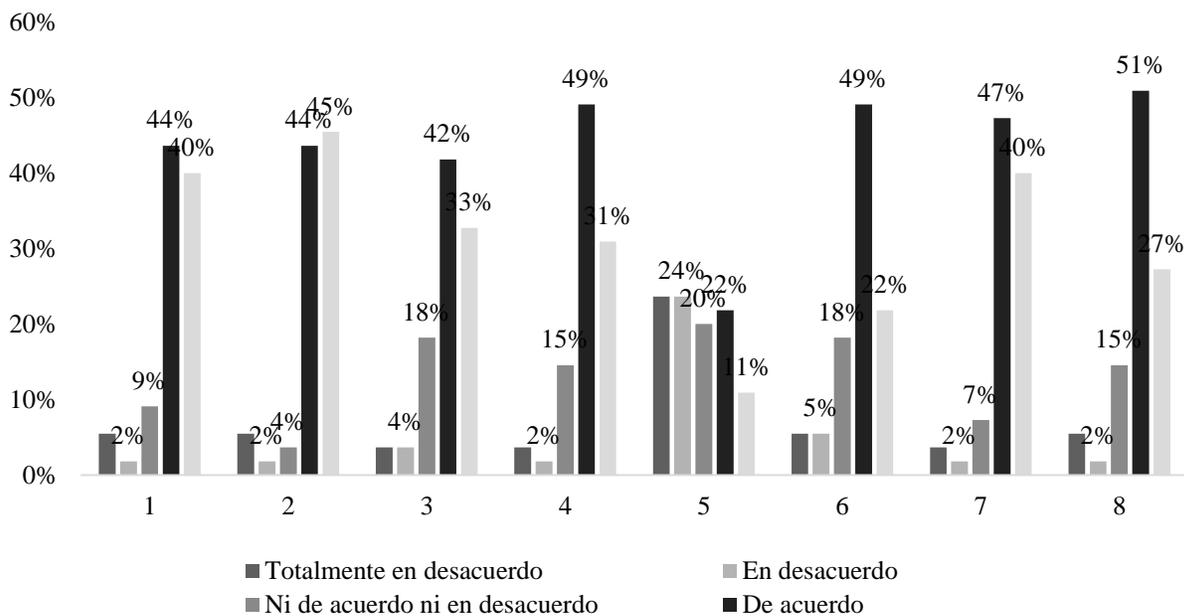


A partir del gráfico 2, el 85 % está de acuerdo con que la matemática en conjunto con los diagramas de Voronoi tiene una motivación adicional y que combinada con la tecnología proveen un soporte importante al arquitecto y que la geometría básica aporta de forma determinante al desarrollo de las innovaciones arquitectónicas y finalmente que, la naturaleza y la matemática, brindan una alternativa distinta para su implementación en la Arquitectura.

Componente del taller: 3. Las aplicaciones arquitectónicas de los diagramas de Voronoi

**Figura 4.**

*La arquitectura y los diagramas de Voronoi*



Fuente: elaboración propia.

Como consecuencia del desarrollo del taller y en referencia al gráfico 3, los resultados relevantes que se obtuvieron fueron: que el 33 % de los participantes están de acuerdo que los diagramas de Voronoi se aplican de forma exclusiva en la arquitectura y un 47 % están en desacuerdo; además el 89 % piensa que los diagramas de Voronoi se deben implementar como una opción válida en



los diseños arquitectónicos, así como un 87% está de acuerdo en que la aplicación de Voronoi aporta otra perspectiva de análisis en la rama del urbanismo arquitectónico.

## **Conclusiones**

Los estudiantes de la facultad de arquitectura de la Universidad Tecnológica Indoamérica, redefinieron y repensaron cómo desde objetos sencillos, pero con gran potencial, como son los diagramas de Voronoi, se pueden proponer diseños arquitectónicos para una arquitectura innovadora y disruptiva; muestra de esto y en base a los resultados es que al inicio la gran mayoría de estudiantes desconocía de los diagramas de Voronoi y luego de conocido y desarrollado el tema estuvieron en capacidad de expresar sus diseños con las propuestas de integración de los diagramas en distintos objetos, como son fachadas, objetos 3D, mueblería, adornos y muchas otras ideas que se obtuvieron al final del proceso.

El desconocimiento de los diagramas de Voronoi, entre la gran mayoría de estudiantes, hace que sea imperiosa la inclusión en la formación de los estudiantes los diagramas de Voronoi, dentro del diseño curricular general, esto desde la opinión de los participantes, hará que se logren mejores diseños, que incluyan conceptos que desde la naturaleza y los seres vivos, es posible apreciar.

Desde la matemática el desarrollo del taller permitió generar un valor agregado de la motivación hacia el diseño arquitectónico con la inclusión de la tecnología y la computación, con estructuras y propuestas urbanas que sean alternativas a las tradicionales

El estudiante generó conciencia de la presencia mayoritaria de formas básicas en los diseños arquitectónicos a la vez que los diagramas de Voronoi se convirtieron en una alternativa válida para contraponer otra concepción al momento de repensar la arquitectura y con la opinión de que este contenido se integre en la formación profesional; además quedó claro que no solo es una propuesta distinta, sino que posee propiedades estructurales que permiten sustentar la elección de un diagrama de Voronoi, desde el análisis de la encuesta inicial y los resultados obtenidos de forma posterior y de los ejemplos analizados en clase, la gran variedad de aplicaciones posibles de los diagramas, se evidenció en los trabajos entregados que se interiorizó Voronoi, como una alternativa importante a la geometría euclídea, posicionando la idea de ampliar las opciones de la



figuras básicas por otras que tengan una mayor significado implícito dentro de ellas , como es el caso de Voronoi.

El taller sobre los diagramas de Voronoi, dejó en los participantes, la claridad de que no es un concepto exclusivo de la arquitectura y que no solo aporta al diseño arquitectónico, sino también al diseño urbanístico y a una infinidad de aplicaciones que existen y están presentes alrededor; el arquitecto tiene esta herramienta representacional a su alcance.

Como una recomendación de tipo metodológico y bajo el sustento de los resultados, se sugiere que los docentes implementen procesos didácticos que tengan como finalidad la aplicación de los diagramas de Voronoi en sus clases, una alternativa válida es la propuesta de resolución de problemas donde se plantea la aplicación del diagrama, que puede ser sobre un objeto o fachada existente, luego del análisis del contexto situacional integral del sitio, se puede efectuar un boceto de la solución previa de la aplicación del diagrama, teniendo muy en cuenta que las posibilidades de generar un diagrama de Voronoi son infinitas, finalmente se aplicaría la propuesta sobre el sitio y se puede proponer desde la elaboración desde una maqueta, hasta un modelado en 3D, de la inclusión del diagrama, como solución al problema.

### **Referencias bibliográficas**

- Aguilar Montilla, F. J. (2018). El escutoide: un nuevo enfoque didáctico en geometría. <https://bit.ly/3z65Ggj>
- Agudelo, T., Mejía, I. C. y Rojas, S. M. (2015). *Aplicaciones estructurales del diagrama Voronoi para la amortiguación de impactos partiendo del estudio del pericarpio y mesocarpio de los frutos cítricos*. [Tesis de Licenciatura de la Escuela de Arquitectura y Diseño, de la Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://n9.cl/45v4p>
- Annisa, A. y Angraeni, L. (2021). Consulta de selección de ubicación en Google Maps utilizando el algoritmo de horizonte espacial (VS2) basado en Voronoi. *Jurnal Online Informatika*, 6 (1), 25-32.
- Asghar, Q., Jalil, A. y Zaman, M. (2020). Autoorganización analizada en arquitectura utilizando sistemas de partículas y teselación de Voronoi. *Revista técnica*, 25 (03), 1-10.



- Cabas, M. R. (2021). La generación de un concepto arquitectónico: 6 estrategias académicas para lograrlo. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/8279>
- Crespo, M., González, M. D. L. Á. y Sanabria, K. (2016). La contribución de la matemática a la formación socio-humanista de los futuros arquitectos. Edificio Caracol; Barcelona, España. (2021). *ARQ (Santiago)*, (107), 58-67. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962021000100058>
- Fuentealba, J. S., Barrientos, M. P., Goycoolea, R., Quesada, F., Célis d'Amico, F., Martín, J. J. y Verdasco, A. (2019). Los inicios y los finales. Transformaciones docentes post Bolonia. El caso de la escuela de arquitectura de la universidad de Alcalá (UAH). *Arquitecturas del sur*, 37(56), 28-41. <https://dx.doi.org/10.22320/07196466.2019.37.056.02>
- Gaburro, E., Boscheri, W., Chiocchetti, S., Klingenberg, C., Springel, V. y Dumbser, M. (2020). Esquemas Arbitrarios-Lagrangianos-Eulerianos directos de alto orden en mallas de Voronoi en movimiento con cambios de topología. *Revista de Física Computacional*, 407, 109167. <https://arxiv.org/pdf/1905.00967.pdf>
- Estévez, “Arquitectura biodigital y genética: adecuación, relevancia y compromiso”, en Iliana Hernández García, Raúl Niño Bernal, Jaime Hernández-García (eds.), Paisajes artificiales: virtuales, informales, edificados, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2020, pp. 103-123. (ISBN 978-958-781513-9). <https://bit.ly/3eg3F9p>
- Gawrychowski, P., Kaplan, H., Mozes, S., Sharir, M. y Weimann, O. (2021). Diagramas de Voronoi en gráficos planos y cálculo del diámetro en tiempo determinista  $O(n^{5/3})$ . *Revista SIAM de Computación*, 50 (2), 509-554. <https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611975031.33>
- Hernández-Sampieri, R. y Torres, C. P. M. (2018). *Metodología de la investigación*. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. [https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)



- Hu, J., Niu, H., Carrasco, J., Lennox, B. y Arvin, F. (2020). Exploración autónoma de múltiples robots basada en Voronoi en entornos desconocidos a través del aprendizaje por refuerzo profundo. *Transacciones IEEE sobre tecnología vehicular*, 69(12), 14413-14423.
- Igashov, I., Olechnovič, K., Kadukova, M., Venclovas, Č. y Grudinín, S. (2021). VoroCNN: red neuronal convolucional profunda construida sobre la teselación 3D Voronoi de estructuras de proteínas. *Bioinformática*, 37(16), 2332-2339.
- Muller, A. L., Gericke, O. J. y Pietersen, J. P. J. (2020). Methodological approach for the compilation of a water distribution network model using QGIS and EPANET. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 62(4), 32-43.
- Mumm, M. (2004). Diagramas de Voronoi. *El entusiasta de las matemáticas*, 1(2), 44-55.
- Nowak, A. (2015). Aplicación de los diagramas de Voronoi en la arquitectura y el urbanismo contemporáneos. *Desafíos de la tecnología moderna*, 6(2), 30-34.
- Ortega, L. (2020). Diagramas de Voronoi, ¿qué centro de salud tengo más cerca? Tesis de maestría Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/18885/OrtegaDelCampoLucia.pdf?sequence=1>
- Pokojski, W. y Pokojaska, P. (2018). Diagramas de Voronoi: inventor, método, aplicaciones. *Polish Cartographical Review*, 50(3), 141-150. DOI: 10.2478/pcr-2018-0009
- Rodrigues, M., Bonfim, C., Portugal, J. L., Frias, P. G. D., Gurgel, I. G. D., Costa, T. R. y Medeiros, Z. (2014). Análise espacial da mortalidade infantil e adequação das informações vitais: uma proposta para definição de áreas prioritárias. *Ciência & Saúde Coletiva*, 19, 2047-2054.
- Şahin, A. y Hatipoğlu, B. (2017). Examinar el uso de diagramas de Voronoi en arquitectura en un proyecto de estudiante. 3er Congreso Internacional sobre Nuevas Tendencias en Arquitectura y Diseño de Interiores 28-30 DE ABRIL DE 2017, HELSINKI, FINLANDIA PROCEEDINGS BOOK. [http://95.183.232.221/bitstream/handle/20.500.12498/766/ALI%20SAHIN-BETUL%20HATIPOGLU%20SAH%C4%B0N\\_Voronoi.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://95.183.232.221/bitstream/handle/20.500.12498/766/ALI%20SAHIN-BETUL%20HATIPOGLU%20SAH%C4%B0N_Voronoi.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



- Sanches, C., Guimarães, J., Pires, L., Bastos, I., Rodríguez, L. (2019). Efeito da Taxa de Resfriamento na Liga Ni80Cu20 via Dinâmica Molecular. *Matéria*, 24(1), elocation e-12276
- Soto, Y. y Castro, C. (2016). *Aproximación a los grafos de Voronoi y diagramas de Delaunay*. Encuentro Distrital de Educación Matemática. Memoria del evento. Volumen 3, <http://funes.uniandes.edu.co/10253/1/Orlando2016Aproximaci%C3%B3n.pdf>
- Urgellés, J. V. G. (2019). Euclides no vivió en Manhattan: Geometría urbana. *Modelling in Science Education and Learning*, 12(1), 59-70. <https://polipapers.upv.es/index.php/MSEL/article/view/10808>