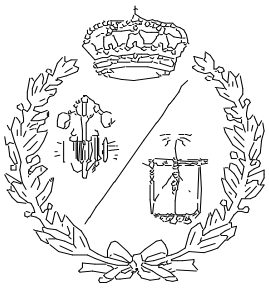
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN POR CORROSIÓN DE LA BARANDILLA DE LA SEGUNDA PLAYA DEL SARDINERO, SANTANDER, ESPAÑA, MEDIANTE LÓGICA FUZZY

(Evaluation of corrosion degradation on the railing of Sardinero's Second Beach, Santander, España, by Fuzzy Logic)

Para acceder al Título de

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autora: Lucía Argüello Cienfuegos
Directora: Maria Victoria Biezma Moraleda
Codirector: Alfonso Fernández del Rincón

Mayo - 2021

TÍTULO	**Evaluación de la degradación por corrosión de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, Santander, España, mediante Lógica Fuzzy**		
AUTORA	**Lucía Argüello Cienfuegos**		
DIRECTORES	**María Victoria Biezma Moraleda / Alfonso Fernández del Rincón**		
TITULACIÓN	*Máster Universitario en Ingeniería Industrial*	**FECHA**	21/05/2021

PLABRAS CLAVE

Corrosión, Lógica Fuzzy, degradación, diseño, inspección, mantenimiento, impacto, El Sardinero, análisis de imágenes, evaluación, MATLAB.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La corrosión es un fenómeno que está presente continuamente a nuestro alrededor, que provoca grandes pérdidas, tanto económicas como estructurales. A pesar de su gran relevancia, no se presta la importancia que un problema, de estas magnitudes, ha de tener. Se debería empezar por tratar de prevenir la aparición de la corrosión y, la forma más efectiva de hacerlo, es actuar desde el diseño y la construcción; es por eso por lo que los ingenieros hemos de estar bien concienciados con la problemática de la corrosión y, cuando no sea posible actuar desde los inicios, tratar de desarrollar planes de mantenimiento adecuados y continuos.

Para dar visibilidad a este problema en un lugar tan concurrido como es la Playa del Sardinero, en Santander, se estudia en este Proyecto Fin de Máster la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, una estructura vulnerable al ambiente marino que predomina en este lugar, siendo especialmente susceptible a experimentar problemas de corrosión.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Para evaluar la degradación por corrosión de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, ubicada en Santander, España, y mediante la Lógica Fuzzy, se parte de una inspección visual, para realizar un diagnóstico de la problemática existente en la barandilla, prestando mucha atención a los errores de mantenimiento y, sobre todo, a aquellos tramos donde la pérdida de material es total, pudiendo esto dar lugar a problemas verdaderamente importantes.

Se divide el escenario de estudio en tres zonas, en función de su situación respecto al mar, las cuales, y tras una primera inspección, se detectó que tenían niveles de corrosión diferentes.

Tras la inspección visual llega el momento de capturar fotográficamente el estado de la barandilla, para realizar así un análisis de imágenes mediante Matlab. Se recogen un total de, aproximadamente, 900 fotografías, de las cuales se seleccionarán 90, en concreto, 30 por cada zona de estudio.

Una vez obtenidos los resultados del análisis fotográfico, se trasladan estos valores a la Fuzzy Toolbox de Matlab, para así llevar a cabo el desarrollo de la Lógica Difusa o Fuzzy Logic. Este software nos proporcionará finalmente los valores del grado de corrosión correspondiente a cada zona de estudio, tanto de forma numérica como gráfica.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

CONCLUSIONES:

- El fenómeno de la corrosión es un factor importante a tener en cuenta en la ciudad de Santander, debido a los altos valores de humedad relativa que predominan durante todo el año, y al ser una ciudad de ambiente marino.
- Uno de los puntos clave en la estrategia anticorrosión es el empleo de materiales resistentes a la misma, considerando exhaustivamente el tipo de ambiente, además de realizar etapas de inspección y mantenimientos exhaustivos.
- La barandilla de la Segunda Playa del Sardinero objeto de estudio, presenta zonas donde predomina la corrosión por picaduras, reconociendo picadura como la corrosión incipiente que ha progresado a partir de la rotura local del recubrimiento orgánico que cubría los componentes metálicas, desde aquellas de grandes dimensiones que llevan a la pérdida de material, hasta ampollas del recubrimiento orgánico ocasionadas por la errónea aplicación de este sobre productos de corrosión, sin eliminar en la etapa de mantenimiento.
- Se presencian zonas de barandilla con ataques debidos a la corrosión por erosión, relacionados con el impacto del agua del mar, acompañado por el viento, la lluvia y la humedad permanente y elevada.
- Del 100% de la corrosión detectada, el 47,42% se encuentra en la Zona 1, por el 33,96% de la Zona 2 y el 18,62% de la Zona 1.
- Sin lugar a duda, el escenario más afectado por la corrosión es la Zona 3, ensenada del Sardinero, donde los fenómenos atmosféricos destrozan día tras día la barandilla objeto de estudio.
- La Lógica Difusa o Método Fuzzy proporciona resultados que la Lógica Clásica no percibe. A partir de los datos obtenidos mediante el análisis de imágenes, aplicando el Método Fuzzy, se obtienen gráficas distintivas que aportan datos realmente valiosos para el análisis de la corrosión, fenómeno en el cual los múltiples factores incidentes se comportan de formas muy distintas.
- Una vez aplicados los tres pasos esenciales, inspección visual, análisis fotográfico y Lógica Fuzzy, los resultados obtenidos son las variables de salida, que muestran los grados de corrosión y confirman los presagios iniciales. Los valores del grado de corrosión extraídos de Matlab son los que siguen, siendo 0.5 el valor de la Zona 1, un grado de corrosión medio (M), esta es la Zona menormente afectada por la corrosión, 0.75 para la Zona 2, grado de corrosión alto (A), y 0.795 en la Zona 3, donde ya aparece un grado de corrosión muy alto (MA).
- Se detecta una necesidad elevada de establecer procedimientos de mantenimiento correctos para evitar la pérdida completa de material en muchos puntos de la barandilla, pues suponen en un riesgo real e inminente para la población.

PRESUPUESTO:

El presupuesto necesario para el correcto desarrollo de este proyecto es un presupuesto relativo a recursos humanos, materiales, de software, así como a otros recursos (desplazamientos).

Tras realizar los pertinentes cálculos se obtiene la cifra de 23.848,68€ como presupuesto total del presente proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

F. C. Gómez de León Hijes and D. J. Alcaraz Lorente, *Manual básico de corrosión para ingenieros*, 1ª Edición. Murcia: Universidad de Murcia. Servicio de publicaciones, 2004.

A. Castañeda, F. Corvo, D. Fernández, and C. Valdés, "Outdoor-Indoor Atmospheric Corrosion in a Coastal Wind Farm Located in a Tropical Island," *Eng. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 43–62, 2017, doi: 10.4186/ej.2017.21.2.43.

I. Bertuccio and M. V. Biezma Moraleda, "Risk assessment of corrosion in oil and gas pipelines using fuzzy logic," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 7, pp. 553–558, 2012, doi: 10.1179/1743278212Y.0000000028.

M. E. Edward Ghali, V. S. Sastri, *Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

Mars G. Fontana, *Corrosion engineering*, 2nd Revise. Mc Graw Hill, 1986.

NACE International, "The Global Cost and Impact of Corrosion," Accessed: Jul. 02, 2020. [Online].

AENOR, "UNE-EN ISO 11463:2009 Corrosión de metales y aleaciones. Evaluación de la corrosión por picaduras. (ISO 11463:1995)." 2009.

AENOR, "UNE-EN ISO 12944-1. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 1: Introducción general," 2017.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-:2016 Evaluación del grado de descamación," 2016.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-2:2016 Evaluación del grado de ampollamiento," 2016.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-3:2016 Evaluación del grado de oxidación," 2016.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-4:2016 Evaluación del grado de agrietamiento," 2016.

I. Cobo, M. V. Biezma, and L. Sánchez, "Estudio microestructural de bronces de aluminio y níquel (NAB) y bronces de aluminio y manganeso (MAB): Efecto de dos reactivos químicos.," vol. 1, no. 3, pp. 59–62, 2017.

M. A. Lubiano, P. González-Gil, H. Sánchez-Pastor, C. Pradas, and H. Arnillas, "An incipient fuzzy logic-based analysis of the medical specialty influence on the perception about mental patients," Oviedo, 2018.

TITTLE	**Evaluation of corrosion degradation on the railing of Sardinero's Second Beach, Santander, España, by Fuzzy Logic**		
AUTOR	**Lucía Argüello Cienfuegos**		
DIRECTORS	**María Victoria Biezma Moraleda / Alfonso Fernández del Rincón**		
DEGREE	*Máster Universitario en Ingeniería Industrial*	**FECHA**	21/05/2021

KEYWORDS

Corrosion, Fuzzy Logic, degradation, design, inspection, maintenance, impact, El Sardinero, image analysis, evaluation, MATLAB.

PROBLEM'S APRROACH

Corrosion is a phenomenon that is continuously present around us, causing great losses, both economic and structural. In spite of its great relevance, it is not given the importance that a problem of this magnitude must have. We should start by trying to prevent the appearance of corrosion and the most effective way to do this is to act from the design and construction; that is why engineers must be fully aware of the problem of corrosion and, when it is not possible to act from the beginning, try to develop suitable and continuous maintenance plans.

In order to give visibility to this problem in such a busy place as the Sardinero Beach, in Santander, the railing of the Second Sardinero Beach, a sensitive structure to the marine environment that prevails in this place, being especially susceptible to experience corrosion problems, is studied in this Master's Thesis.

DESCRIPTION OF THE PROJECT

Evaluating the corrosion degradation of the railing of the Second Sardinero Beach, located in Santander, Spain, and by means of Fuzzy Logic, a visual inspection is carried out to diagnose the existing problems in the railing, paying close attention to the maintenance errors and, above all, to those sections where the loss of material is total, which can lead to really important problems.

The study area is divided into three zones, according to their situation with respect to the sea, which, after an initial inspection, were found having different levels of corrosion.

After the visual inspection, it was time to photographically capture the condition of the railing, in order to perform an image analysis using Matlab. A total of approximately 900 photographs were collected, of which 90 were selected, 30 for each study zone.

Once the results of the photographic analysis are obtained, these values are transferred to the Fuzzy Toolbox of Matlab, in order to carry out the development of the Fuzzy Logic. This software will finally provide us with the values of the degree of corrosion corresponding to each study zone, both numerically and graphically.

CONCLUSIONS / BUDGET

- Corrosion phenomenon is an important factor to take into account in the city of Santander, due to the high relative humidity values that prevail throughout the year, and to the fact that it is a marine environment city.

- One of the key points in the anti-corrosion strategy is the use of corrosion-resistant materials, considering exhaustively the type of environment, in addition to carrying out exhaustive inspection and maintenance stages.

- The railing of the Second Sardinero Beach under study, presents areas where pitting corrosion predominates, recognizing pitting as the incipient corrosion that has progressed from the local breakage of the organic coating that covered the metal components, from those of large dimensions that lead to the loss of material, to blisters of the organic coating caused by the erroneous application of this on corrosion products, not eliminated in the maintenance stage.

- There are areas of railing with attacks due to erosion corrosion, related to the impact of sea water, accompanied by wind, rain and permanent and high humidity.

- Of the 100% of the corrosion detected, 47.42% is in Zone 1, compared to 33.96% in Zone 2 and 18.62% in Zone 1.

- Undoubtedly, the most affected by corrosion is Zone 3, Sardinero inlet, where atmospheric phenomena destroy the railing under study day after day.

- The Fuzzy Logic or Fuzzy Method provides results that the Classical Logic does not perceive. From the data obtained through the analysis of images, applying the Fuzzy Method, distinctive graphs are obtained that provide really valuable data for the analysis of corrosion, a phenomenon in which the multiple incident factors behave in very different ways.

- Once the three essential steps have been applied, visual inspection, photographic analysis and Fuzzy Logic, the results obtained are the output variables, which show the corrosion degrees and confirm the initial predictions. The values of the corrosion degree extracted from Matlab are the following, being 0.5 the value for Zone 1, a medium corrosion degree (M), this is the Zone less affected by corrosion, 0.75 for Zone 2, high corrosion degree (A), and 0.795 in Zone 3, where already appears a very high corrosion degree (MA).

- There is a great need to establish correct maintenance procedures to avoid the complete loss of material at many points of the railing, as they pose a real and imminent risk to the population.

BUDGET:
The budget necessary for the correct development of this project is a budget related to human resources, materials, software, as well as other resources (travel).
After making the relevant calculations, the total budget for this project is ***€23,848.68.***

BIBLIOGRAPHY

F. C. Gómez de León Hijes and D. J. Alcaraz Lorente, *Manual básico de corrosión para ingenieros*, 1ª Edición. Murcia: Universidad de Murcia. Servicio de publicaciones, 2004.

A. Castañeda, F. Corvo, D. Fernández, and C. Valdés, "Outdoor-Indoor Atmospheric Corrosion in a Coastal Wind Farm Located in a Tropical Island," *Eng. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 43–62, 2017, doi: 10.4186/ej.2017.21.2.43.

I. Bertuccio and M. V. Biezma Moraleda, "Risk assessment of corrosion in oil and gas pipelines using fuzzy logic," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 7, pp. 553–558, 2012, doi: 10.1179/1743278212Y.0000000028.

M. E. Edward Ghali, V. S. Sastri, *Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

Mars G. Fontana, *Corrosion engineering*, 2nd Revise. Mc Graw Hill, 1986.

NACE International, "The Global Cost and Impact of Corrosion," Accessed: Jul. 02, 2020. [Online].

AENOR, "UNE-EN ISO 11463:2009 Corrosión de metales y aleaciones. Evaluación de la corrosión por picaduras. (ISO 11463:1995)." 2009.

AENOR, "UNE-EN ISO 12944-1. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 1: Introducción general," 2017.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-:2016 Evaluación del grado de descamación," 2016.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-2:2016 Evaluación del grado de ampollamiento," 2016.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-3:2016 Evaluación del grado de oxidación," 2016.

AENOR, "UNE-EN ISO 4628-4:2016 Evaluación del grado de agrietamiento," 2016.

I. Cobo, M. V. Biezma, and L. Sánchez, "Estudio microestructural de bronces de aluminio y níquel (NAB) y bronces de aluminio y manganeso (MAB): Efecto de dos reactivos químicos.," vol. 1, no. 3, pp. 59–62, 2017.

M. A. Lubiano, P. González-Gil, H. Sánchez-Pastor, C. Pradas, and H. Arnillas, "An incipient fuzzy logic-based analysis of the medical specialty influence on the perception about mental patients," Oviedo, 2018.

INDICE

INDICE 1
GLOSARIO 3
1. INTRODUCCIÓN 7
1.1.- Justificación 7
1.2.- Objetivos 8
1.3.- Planteamiento 9
2. ESTADO DEL ARTE 18
2.1.- La Corrosión 18
2.2.- Principio electroquímico 21
2.3.- Tipos de corrosión 25
2.3.1.- Procesos corrosivos 25
2.3.2.- Formas de corrosión 26
2.3.3.- Corrosión uniforme 27
2.3.4.- Corrosión galvánica 28
2.3.5- Corrosión en resquicio 30
2.3.6.- Corrosión por picadura 31
2.3.7.- Corrosión intergranular 34
2.3.8.- Corrosión selectiva 35
2.3.9.- Corrosión por erosión 36
2.3.10.- Corrosión bajo tensión 38
2.3.11.- Corrosión fatiga 39
2.3.12.- Corrosión atmosférica, y causada por aguas y por suelos 40
2.4.- Control y protección de la corrosión 44
2.4.1.- Protección frente la corrosión por empleo de recubrimientos orgánicos: Pinturas 51
2.5.- Influencia de los agentes externos 66
2.6.- Lógica difusa 69
2.6.1.- Conjuntos difusos 71
2.6.2.- Operaciones con conjuntos difusos 74
2.6.3.- Propiedades 75
2.6.4- Etapas del Método *Fuzzy* (Lógica Difusa) 75
3. MÉTODOLOGÍA DE TRABAJO 81
3.1.- Planteamiento y Localización 81
3.2.- Material y diseño 85
3.3.- Terminología 91
3.4.- Adquisición de imágenes de los elementos estructurales corroídos 97
3.4.1.- Toma y selección de fotografías en cada zona crítica 98
3.4.2.- Procesamiento de imágenes 99
3.5.- Cálculo de variables 101
3.5.1.- Procesado digital y análisis de imágenes 101
3.5.2.- Imagen digital. Conceptos básicos 104
3.5.3.- Espacio de color empleado en el presente Proyecto 109
3.5.4.- Segmentación de imágenes 110
3.5.5.- Código de medida del grado de corrosión 118
3.5.6.- Modelización de las imágenes con Matlab 122
3.5.7.- Cálculo de áreas 124
3.6.- Método *Fuzzy* aplicado al presente Proyecto 125

3.6.1.- Conjuntos de entrada 125
3.6.2.- Conjuntos de salida 126
3.6.3.- Etapas del proceso 126
4. RESULTADOS 137
4.1.- Resultados obtenidos del procesado de imágenes con Matlab 137
4.1.1.- Zona 1 138
4.1.2.- Zona 2 141
4.1.3.- Zona 3 144
4.2.- Grado de corrosión de cada zona seleccionada 148
4.2.1.- Zona 1 148
4.2.2.- Zona 2 155
4.2.3.- Zona 3 161
4.3.- Análisis de los Resultados 168
5. CONCLUSIONES 170
6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO 176
6.1.- Planificación 176
6.2.- Presupuesto 177
7. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO 180
8. BIBLIOGRAFÍA 182
ANEXO I ÍNDICE DE FIGURAS 191
ANEXO II ÍNDICE DE TABLAS 199
ANEXO III PROCESADO DE IMÁGENES 202

GLOSARIO

Ampollamiento: Formación de ampollas, burbujas huecas o gotas de agua en una capa de pintura. Usualmente se debe a la expansión del aire o la humedad atrapados bajo dicha capa. Las burbujas también se forman alrededor de los cristales de sal que quedan bajo la pintura, dado esto a la atracción que ejerce la sal sobre la humedad.

Array: Es un tipo de dato estructurado que permite almacenar un conjunto de datos homogéneo, es decir, todos ellos del mismo tipo y relacionados.

Condensación capilar: La condensación capilar de Kelvin es la fase final del proceso de adsorción de un vapor en un sólido poroso, permite determinar la distribución de tamaño de los poros en mesoporosos, expresado en forma cuantitativa por la ecuación de Kelvin.

Conjunto difuso: Denominado también conjunto borroso (*fuzzy set*), puede contener elementos de forma parcial, es decir que un elemento *X*, pertenezca a un conjunto *A*, con un grado parcial de verdad.

Descamación: Debilitación de la primera capa o capa superficial de la pintura, esta comienza a agrietarse y desprenderse de la pared o superficie donde se encuentran.

Diagrama de isocorrosión: Herramienta de trabajo que permite reconocer situaciones de corrosión alta durante el proceso de diseño de un equipo.

Efecto barrera: Tipo de protección que ejercen las pinturas sobre los substratos metálicos, haciendo de aislante e impidiendo la entrada del oxígeno, agua e iones a la superficie del metal, evitando así que se produzca la corrosión.

Efecto de la distancia a la costa: Es el efecto de las partículas salinas que acelera el proceso de corrosión metálica en la superficie de los metales.

Espacio CMYK: Modelo de color compuesto por tres colores básicos: Cian, Magenta y Amarillo (Yellow). La K viene del negro, ya que la combinación de los anteriores produce negro puro.

Espacio RGB (*Red Green Blue*): Modelo de colores primarios formado por Rojo Verde y Azul. Se basa en la capacidad de la que dispone el ojo humano para distinguir entre estos tres colores primarios.

Espacio L*a*b: Modelo de color basado en la percepción que tiene el ojo humano acerca del color y diseñado para ser independiente del dispositivo en el que se utilice, ya sea impresora o pantalla.

Función de pertenencia: Define a un conjunto *fuzzy* mapeando entradas abruptas de su dominio hasta su Grado de Pertenencia.

Grado de pertenencia: El grado de pertenencia de un elemento a un conjunto es la circunstancia de formar parte de éste. En el método *fuzzy* un elemento puede o no pertenecer a un conjunto, donde la frontera no está precisamente definida, y cuyo grado de pertenencia se representa por un valor entre 0 y 1.

Herrumbre: Capa de color rojizo, generalmente mezcla de óxidos e hidróxidos, que se forma en la superficie tanto del hierro como de sus aleaciones.

Higroscópico: Sustancia capaz de absorber la humedad del aire. Las sustancias higroscópicas se usan como desecantes, ya que absorben el agua de otros compuestos.

Imagen Binaria: Imagen digital reducida de información, en la que sólo persisten los valores de verdadero y falso. En una imagen digital estos valores se representan por 0 y 1 o por negro y blanco.

Iluminación: Capacidad que posee un color para reflejar la luz blanca que incide sobre él. Claridad u oscuridad de un tono.

Lógica *Fuzzy*: Esta lógica facilita un mecanismo de interferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano mediante sistemas basados en el conocimiento. Se trata de una lógica multivaluada basada en reglas heurísticas de la forma Si (*IF*), Entonces (*THEN*), No (*NO*). En el marco matemático, la lógica *fuzzy*, permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que puedan tratarse a través de un ordenador.

Lógica *multivaluada:* Lógica donde, a diferencia de la metodología clásica, no existe la dualidad: verdadero/falso, sino que se trabaja con funciones características y un sinfín de variables posibles como, por ejemplo, alto o bajo, mucho o poco, etc.

Método del centroide: Método de *defuzzificacion* que transforma la salida difusa en un número real, la coordenada *x* de centro de gravedad del conjunto difuso de salida.

Modelo HSV (*Hue Saturation Value*) y HSL (*Hue Saturation Lightness*): Modelos de color que comparten que incluyen parámetros adicionales al matiz o croma para obtener el color, como son la saturación (en ambos), el valor (en HSV) o la luminosidad (en HSL).

Modelo de color: Conjunto de colores primarios a partir de cuyas mezclas, se pueden obtener otros colores que permitan cubrir todo el espectro visible, además del propio blanco, negro y grises.

Modo de color: Expresa la cantidad máxima de datos de color que pueden almacenarse en un determinado formato de archivo gráfico y su objetivo consiste en facilitar la especificación de los colores de una forma normalizada

MAB: *Manganese Nickel Aluminium Bronze.* Se denomina así a los bronces de aluminio y manganeso.

NAB: *Nickel Aluminium Bronze.* Se denomina así a los bronces de aluminio y níquel.

Pátina: Capa de óxido de color verdoso que, por la acción de la humedad, se forma en los objetos compuestos de cobre y alguna de sus aleaciones.

Procesado Digital de Imágenes (PDI): Proceso digital de imágenes encargado de almacenar, transmitir y representar la información de imágenes digitales por medio de una computadora digital.

Punto de rocío: Se considera punto de rocío a la temperatura a la que debe enfriarse una masa de aire para provocar la condensación del vapor del agua.

Show binary: En castellano, mostrar binario; es un comando de Matlab que nos permite mostrar, a partir de una imagen, su correspondiente binaria.

Universo de discurso: También llamado dominio de discurso, es el conjunto de cosas acerca de las cuales se habla en un determinado contexto o situación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1.- Justificación

La corrosión es un fenómeno con el que convivimos en nuestro día a día, y sus efectos se pueden observar en las estructuras y objetos que nos rodean. Los riesgos que implica son muy elevados, pues es una de las principales causas de la pérdida de resistencia mecánica de las estructuras, pudiendo llegar a su colapso, hecho que resulta especialmente llamativo para nosotros, los ingenieros. La corrosión es la causa más general de la transformación y la destrucción de la mayor parte de los materiales metálicos [1].

La RAE define la corrosión como el "desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos" [2]. La corrosión es un proceso natural, ataca destructivamente a todos los metales, por reacción química o electroquímica con el medio que lo rodea (aire, agua, suelo, etc.). Otros materiales no metálicos, como los polímeros o las cerámicas, no sufren corrosión, sino que se agrietan, degradan o rompen [1].

Este fenómeno ha existido siempre y, a pesar de que los daños causados pueden ser muy extensos, no se ha prestado ni se presta la atención necesaria. Cabe destacar que alrededor de un 25% de la producción de acero es destruida por el fenómeno de corrosión. Algunos de los problemas originados en estas aleaciones son la pérdida de su sección y la disminución de su vida útil.

Los costes debidos a la corrosión, se sitúan alrededor de un 3,4% del PIB mundial, los cuales podrían reducirse mediante la aplicación de mejores prácticas en la industria hasta en un 35% [3][4].

Los problemas derivados de la corrosión difieren en riesgo en función del medio en el que se produzcan, bien sea rural o urbano y, dentro del medio urbano, cabe distinguir las zonas interiores de los ambientes marinos o costeros. En lo que a corrosión atmosférica se refiere, su magnitud depende, fundamentalmente, del tiempo durante el cual la superficie metálica está húmeda, e intervienen una serie de factores como son; la lluvia, la humedad relativa, la temperatura, las condiciones de exposición, la contaminación atmosférica, la composición del metal, las propiedades del producto superficial que se forma, etc. [5]. Una de las razones más comunes de fallo, en el caso de las estructuras metálicas costeras, es el

deterioro por corrosión, bien por una inadecuada selección de material o por la falta de mantenimiento, o por ambas. El deterioro se refiere al envejecimiento gradual de la estructura y sus componentes con el paso del tiempo; a menudo pasa desapercibido porque la estructura sigue cumpliendo con sus exigencias pero, si no se controla y corrige, puede llevar al fallo total de la misma [6].

Este Trabajo Fin de Máster, TFM, se llevará a cabo enfocando la problemática de la corrosión a un medio urbano costero. Se estudiará la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, Santander, España, evaluando las consecuencias de su corrosión y las mejoras a desarrollar. Para ello se realizará un análisis fotográfico del entorno, tomando un volumen elevado de fotografías que describan, de manera concisa, cual es la situación actual, aquellas más representativas se analizarán mediante procesamiento y modelado de imágenes, utilizando Matlab, un software de programación y cálculo numérico muy empleado en ingeniería y ciencia, para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Posteriormente, a partir de los datos obtenidos tras el mencionado análisis fotográfico, se empleará la Lógica Difusa (*fuzzy logic*), método que proporciona una forma fácil de tratar con problemas complejos y nos permite estimar la probabilidad de ocurrencia e impacto de un riesgo, como viene a ser la corrosión [7][8][9], repleto de variables influyentes, y que suele actuar de forma sinérgica. El punto fuerte de esta lógica es que permite integrar conocimientos descriptivos junto con datos numéricos indeterminados en un modelo difuso, el cual contiene ambigüedad e imprecisión en representación del conocimiento, al mismo tiempo que utiliza algoritmos de razonamiento aproximados.

1.2.- Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo Fin de Máster consiste en la realización de un análisis del grado de corrosión de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Playa Sardinero II), ubicada en la extensa Bahía de Santander, concretamente entre los Jardines de Piquío y el Mirador del Hotel Chiqui, la cual presenta un estado de deterioro muy avanzado, observándose, en algunos casos, su destrucción total. En la Figura 1 se puede apreciar la vista general de la Segunda Playa del Sardinero.

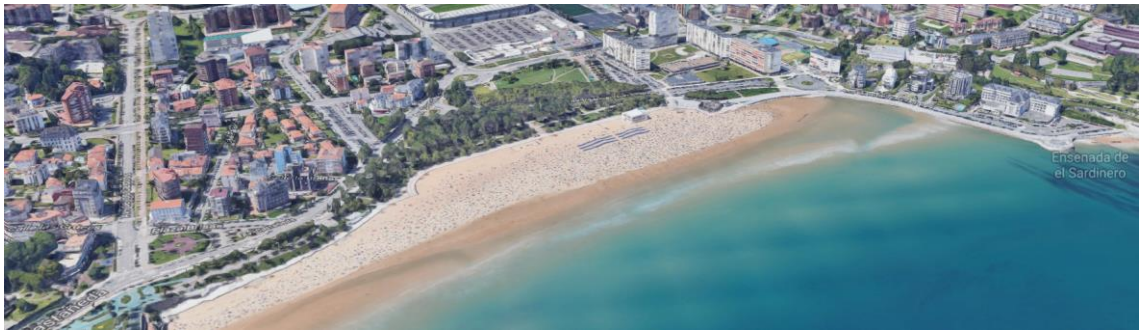


Figura 1. Localización barandilla objeto de estudio (Segunda Playa del Sardinero)

Durante la puesta en marcha y el desarrollo del trabajo se han de tener en cuenta una serie de objetivos:

- Identificación de los problemas de corrosión en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero y estudio de sus causas.
- Capacidad de reconocer, mediante inspección visual, la zona más afectada por la corrosión a lo largo del entorno objeto de estudio.
- Adquisición de conocimientos elementales acerca del procesado digital de imágenes y la Lógica Difusa.
- Analizar la barandilla utilizando la segmentación y el procesado de imágenes, basado en el fenómeno de la corrosión.
- Aplicación de la Lógica Difusa, partiendo de los valores obtenidos mediante el procesado de imágenes, como base para realizar una comparativa de los grados de corrosión presentes en El Sardinero.
- Análisis de los problemas derivados del mal estado de la barandilla.
- Estudio y propuesta de líneas de trabajo futuras.

1.3.- Planteamiento

La segunda playa del Sardinero cuenta con aproximadamente 1000 metros de longitud y sus 80 metros de ancho, característicos en pleamar, están separados del paseo por una barandilla metálica de fundición de acero con un recubrimiento orgánico de color azul. Los recubrimientos orgánicos son, desde el punto de vista cuantitativo, el principal tipo de recubrimiento protector frente a la corrosión, debido a su efecto barrera. Estos engloban pinturas, lacas, recubrimientos plásticos, barnices, esmaltes, etc.

Para alcanzar el objetivo final, analizar el grado de corrosión en la barandilla, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Identificar las distintas zonas de trabajo, denominadas zonas críticas afectadas por la corrosión, en función de las características del entorno. Esta tarea ha de realizarse mediante una rigurosa inspección visual, focalizando la atención en los tramos de barandilla más afectados por este fenómeno.
- Toma de fotografías de cada zona crítica y selección de las más relevantes y significativas.
- Aplicar el procesamiento digital y análisis a las imágenes seleccionadas.
- Analizar los datos obtenidos a partir del procesado de imágenes mediante la Lógica Difusa.
- Comparar los resultados ente las tres zonas críticas, evaluando cuál es la zona más afectada en base a los resultados obtenidos a partir del procesado digital de imágenes y la Lógica Difusa. Evaluar los valores alcanzados, en comparación con las ideas adquiridas tras la inspección visual inicial.
- Recoger unas líneas de actuación o trabajo futuras que ayuden a solventar los problemas de corrosión en El Sardinero.

Los grados de corrosión de la barandilla varían en función, principalmente, de la distancia a la que se encuentra respecto al agua del mar, además del azote sufrido por el oleaje, los coeficientes de mareas, los vientos, etc., estas variables son fundamentales para identificar y seleccionar las zonas críticas.

En la Figura 2 se pueden apreciar las tres zonas críticas afectadas por la corrosión en las que se ha dividido la Segunda Playa del Sardinero para realizar el estudio individual de cada una de ellas, en función de su grado de corrosión. Destacar que en cada una de estas zonas se estudiarán los tramos de barandilla que presenten a lo largo de su longitud muestras de corrosión.

Figura 2. Zonas clave de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)

1. Zona Parque Mesones
2. Recta final Av. Manuel García Lago (desde la rotonda hasta el Mirador del Hotel Chiqui)
3. Parte posterior Mirador del Chiqui, frente al Monumento al Montañés, conocida como Ensenada de El Sardinero.

Cada una de estas zonas se ven afectadas por dicho fenómeno de diferente modo, dadas las distintas variables que contribuirán al fenómeno de corrosión, en mayor o menor medida, y marcarán el desarrollo de la Lógica Difusa, herramienta de análisis comparativo que se describe en el Capítulo 2.

En la Figura 3 se muestra la primera de las zonas identificadas; en ella la barandilla está separada del mar por la arena de la playa, su perfil varía en función de las mareas, siendo la dimensión estándar de aproximadamente 80 metros, esta zona es la menos afectada por la corrosión.

Figura 3. Zona 1: Zona Parque Mesones (Elaboración propia)

En la Figura 4 se puede observar la segunda zona; aquí la distancia con el mar varía también respecto a las mareas, siendo mucho más habitual el contacto mar-barandilla, aumentando, con ello, el grado de corrosión.

Figura 4. Zona 2: Recta Avenida Manuel García Lago (Elaboración propia)

Por último, en la Figura 5, se puede apreciar la tercera zona, la más propicia a corrosión; en ella el mar irrumpe constantemente en la barandilla provocando la habitual rotura de ésta, tanto por el desgaste debido a la corrosión como por los fuertes impactos de las olas.

Figura 5. Zona 3: Ensenada de El Sardinero (Elaboración propia)

Para hacerse una idea inicial, de cuál es el estado de la barandilla, se muestran en las Figuras 6 y 7 fotografías de las distintas zonas identificadas.

Figura 6. Barandilla Segunda Playa del Sardinero, tramo correspondiente a la Zona 2 (Elaboración propia)

Figura 7. Desgaste por corrosión de la barandilla (Elaboración propia)

La corrosión presente a lo largo de la Segunda Playa del Sardinero es una corrosión generalizada, desarrollada en presencia de una atmósfera marina; se agudiza debido a que los óxidos e hidróxidos de hierro son muy voluminosos y provocan el desprendimiento de la pintura. En esas zonas de desprendimiento, se crean las condiciones idóneas para la propagación del fenómeno, lo que daría lugar a ataques localizados, tipo picaduras o roturas que se van extendiendo en diámetro y profundidad. La aparición de las roturas se produce a distinta velocidad en las diferentes zonas del material. La corrosión puede llegar a perforar

las estructuras metálicas, como se aprecia en la Figura 7, lo que aumenta la necesidad de extremar la vigilancia [1].

La adquisición de las fotografías ha sido una de las etapas más complicadas en el desarrollo del presente Proyecto, pues la aparición de la pandemia y sus consiguientes limitaciones de movimiento, hacían los desplazamientos hasta el emplazamiento realmente complicados. Las condiciones idóneas, para obtener unas fotografías con la calidad necesaria para su procesamiento, se dan en días claros, pero sin mucha incidencia del sol, es por esto por lo que se utilizaron las horas de la mañana del mes de Mayo de 2020, en las que se nos permitía salir a pasear (8:00-10:00h), para tomar todas las imágenes en un mismo día. Asimismo, se hizo necesario realizarlas con rapidez pues, justo en ese momento, comenzaron los trabajos de pintado de la barandilla, coincidiendo así con la llegada del verano y los turistas a la ciudad de Santander.

Posterior a la toma de fotografías, se realizará el procesado de imágenes mediante Matlab para las distintas zonas definidas, cuyo resultado serán las variables de entrada de la Lógica Difusa o *Fuzzy*, imprescindibles para el desarrollo del método probabilístico, en el que los pasos a seguir son los reflejados en la Figura 8, que se describirán detalladamente en el Apartado 2.6. Los resultados obtenidos aplicando la Lógica Difusa, llamadas variables de salida, nos llevarán a obtener el objetivo principal, analizar cuál es la zona de la Segunda Playa del Sardinero más afectada por el fenómeno de la corrosión.

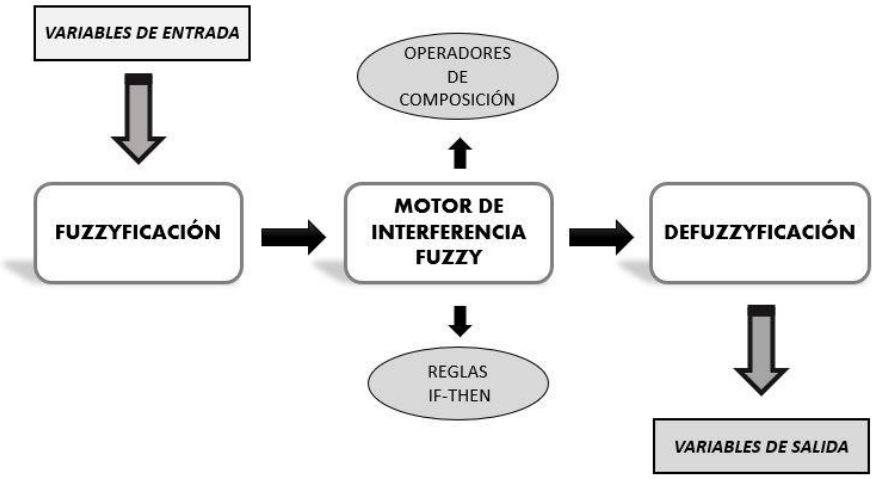


Figura 8. Etapas método de *Fuzzy* (Elaboración propia)

La Figura 9 resume el contenido de este primer capítulo, donde se recoge la justificación del presente Proyecto Fin de Máster, enfocado principalmente en el fenómeno

de la corrosión, junto con el procesado de imágenes y el posterior análisis mediante Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*), los objetivos a seguir durante el desarrollo y, por último, el planteamiento, en donde se distinguen las tres zonas críticas de trabajo. En el Capítulo 3 se recoge de manera más extensa el planteamiento y la metodología de trabajo seguida durante el desarrollo del presente proyecto.

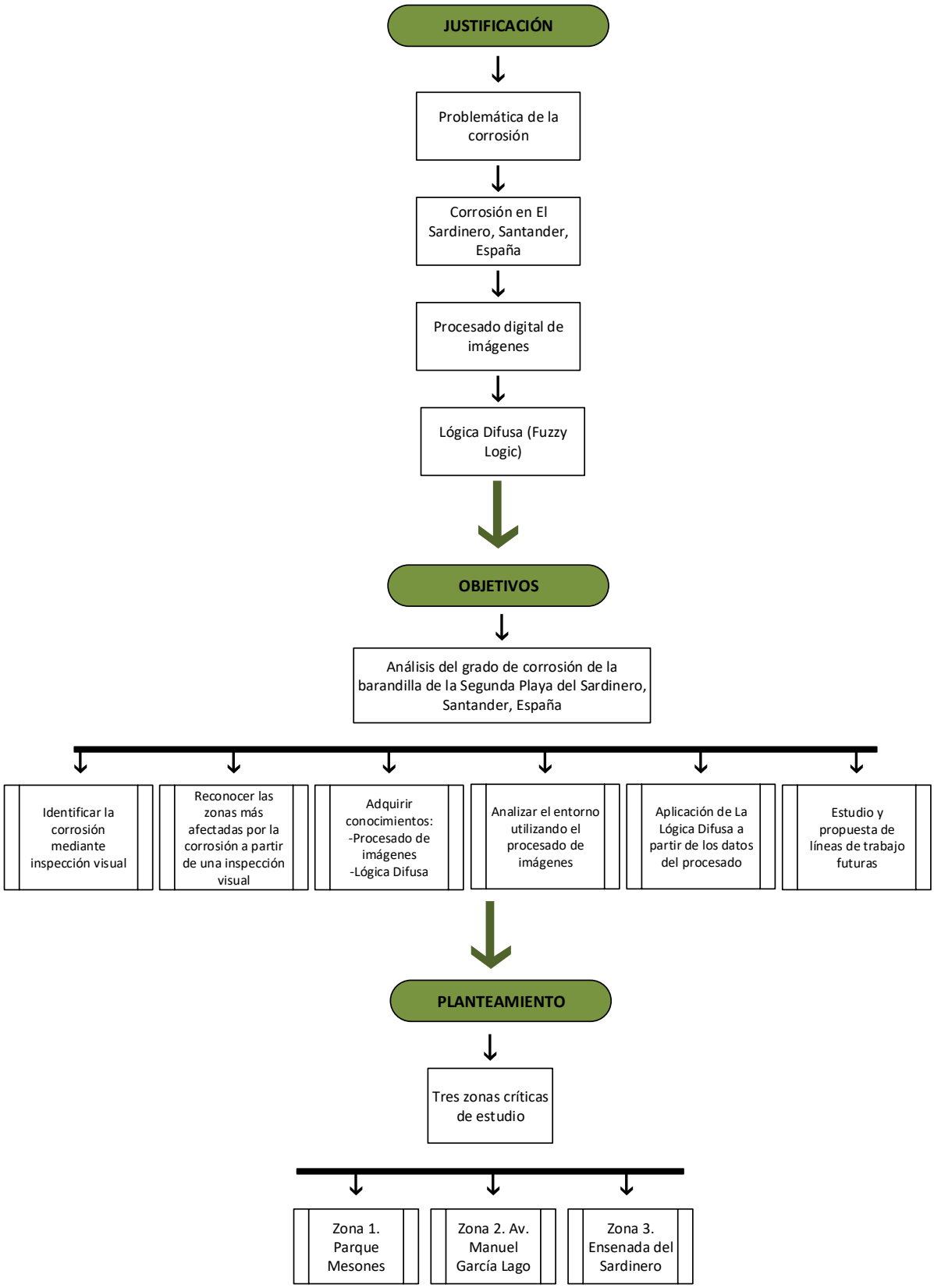


Figura 9. Flujograma resumen Capítulo 1 (Elaboración propia)

Una de las ideas más claras, mantenida desde el momento inicial, tras llevar a cabo la inspección visual de la Segunda Playa del Sardinero, hasta el instante final, una vez

obtenidos los resultados del procesado de imágenes y de la aplicación de la Lógica Fuzzy, es la preocupante presencia de corrosión en la Zona 3, ensenada del Sardinero, donde es estrictamente necesaria la actuación en materia de rehabilitación de la barandilla, y cuyos datos obtenidos, reflejan esta necesidad, pues el área de barandilla con presencia de corrosión, desde la más mínima hasta la más alta, se sitúa en un 65.03% del total.

A continuación, se entrará en el Capítulo 2, en materia teórica, procediendo a explicar el fenómeno de la corrosión junto con la Lógica Difusa o *Fuzzy Logic*, que nos permitirá obtener conclusiones reales a partir de información de entrada ambigua e imprecisa.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1.- La Corrosión

Se denomina corrosión al ataque destructivo que sufren los materiales, generalmente los metálicos, por la reacción química o electroquímica con el medio que los rodea (atmósfera, agua, suelo, etc.). La palabra "corrosión" deriva del latín *corrodere*, cuyo significado es "roer en pedazos", es por esto por lo que se puede decir que una estructura está corroída cuando está comida o desgastada gradualmente, como si hubiese sido *roída* [10].

La reacción que se produce durante el fenómeno de corrosión depende esencialmente de tres factores, estos son la naturaleza química del entorno, la concentración de las especies reactivas y la naturaleza del sistema metálico implicado. Cuando se produce este fenómeno, el cual es, salvo excepciones, de carácter natural, justificado por la termodinámica del sistema, las propiedades de los materiales que han sido afectados se alteran, pudiéndose producir la pérdida de material. Por ello es importante conocer el comportamiento de los materiales frente a los agentes externos, entre los que cabe destacar las sustancias presentes en el medio ambiente, al igual que su forma de interactuar con el resto de los materiales que los rodean. En el caso de los metales, a menos que se protejan adecuadamente, se corroen con mayor o menor facilidad , dependiendo de numerosas variables, siendo la más crítica la composición química de los mismos así como su método de manufactura [1][11][12][13].

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos hasta cierto punto. Algunos de los más usuales son el aire y la humedad; las aguas tanto dulces como destiladas o saladas; las atmósferas industriales, rurales y urbanas; el vapor y otros gases como el cloro, el amoniaco, el dióxido de azufre o los gases combustibles; los ácidos minerales como el sulfúrico y el nítrico; los ácidos orgánicos; los suelos; los disolventes; los aceites vegetales y el petróleo, así como una gran variedad de productos alimenticios [14][15].

Las precipitaciones acuosas (lluvia, nieve, niebla) y la condensación de humedad debido a los cambios de temperatura, son los principales causantes de la corrosión en la atmósfera. La humedad relativa (HR), ejerce un papel muy importante en la corrosión atmosférica, ya que existe un nivel determinado del valor de HR por debajo del cual no es probable este

fenómeno, ya que no existe película de electrolito sobre el metal. Normalmente, la corrosión del hierro y otros metales es insignificante a humedades relativas inferiores al 60-80% [16].

En la Tabla 1 se presenta un esquema donde se recogen algunos de los factores que contribuyen al proceso corrosivo.

Tabla 1. Factores que afectan al proceso corrosivo [11]

Factores que definen las formas de ataque	**Factores metalúrgicos**	**Factores que definen las condiciones de empleo**	**Factores que dependen del tiempo**
• Concentración del reactivo • Contenido en oxígeno • pH del medio • Adiciones de inhibidores • Temperatura • Presión	• Composición de la aleación • Procedimiento de elaboración • Impurezas • Tratamientos térmicos y mecánicos	• Estado de la superficie • Forma de las piezas • Solicitaciones mecánicas • Empleo de inhibidores • Características de las uniones	• Envejecimiento • Tensiones mecánicas • Temperatura • Modificación de los revestimientos protectores

La corrosión alcanza un alto grado de importancia en cuanto a términos económicos se refiere; su impacto económico tiende a ser marcadamente negativo, así es que, la expresión monetaria de este fenómeno lo tacha de “indeseable”. Se estima que aproximadamente el 5% del P.I.B se invierte en prevenir y corregir inconvenientes derivados de la corrosión metálica en un país industrializado. Todos los sectores industriales llegan a perder miles de millones de euros cada año debido al fenómeno de corrosión. A groso modo se estima un coste total por corrosión alrededor de todo el mundo de aproximadamente 2,5 billones de euros, y esa cantidad no incluye las cifras destinadas a seguridad individual o a consecuencias medioambientales. Esa suma es casi un 3,4% del PIB mundial, por lo que queda implícito que la corrosión es un problema masivo y costoso [1][15][17] [18].

En la Figura 10 se muestra un gráfico que representa el PIB invertido en distintas zonas del mundo para combatir la corrosión. Se puede apreciar cómo los países más industrializados son los que presentan un mayor porcentaje.

Figura 10. PIB destinado a la corrosión en diferentes partes del mundo [17]

El coste de las alternativas corrosivas no recoge solo los costes originales instalados, sino todos aquellos que incluyen explotación, inspección, mantenimiento, gastos generales, el coste de devolución de productos de mala calidad debido a la contaminación por corrosión, las paradas no programadas en planta, la pérdida de eficacia en los procesos, los accidentes derivados de este fenómeno y multitud de costes intermedios, como pueden ser los de depreciación, el coste del dinero y las tasas de impuestos [17][18][19][20].

Las estimaciones económicas del coste de la corrosión varían en función de si, a los costes directos se le añaden los costes indirectos. Las pérdidas indirectas son los costes industriales que no se producen directamente en la industria, pero que, por operar en las industrias auxiliares, se suman a los costes de los factores necesarios para dicha industria. Actualmente no se ha encontrado un método definitivo que determine los costes de la corrosión a nivel mundial, las siguientes técnicas son las más aplicadas [19]:

- Método Uhlig, calcula los costes relacionados con la corrosión basándose en los métodos de prevención.
- Método Hoar, realiza estimaciones en varios sectores industriales.
- Método NBS Battelle, también conocido como I/O (*Input/Output*), basado en una matriz de entradas y salidas.

Siempre hay que tener en cuenta que la corrosión se enfrenta con la seguridad; por ello la necesidad de prestar atención a este fenómeno con el que convivimos día a día. En la Figura 11 se presentan algunos de los efectos perjudiciales de la corrosión junto con un ejemplo de cada uno de ellos.

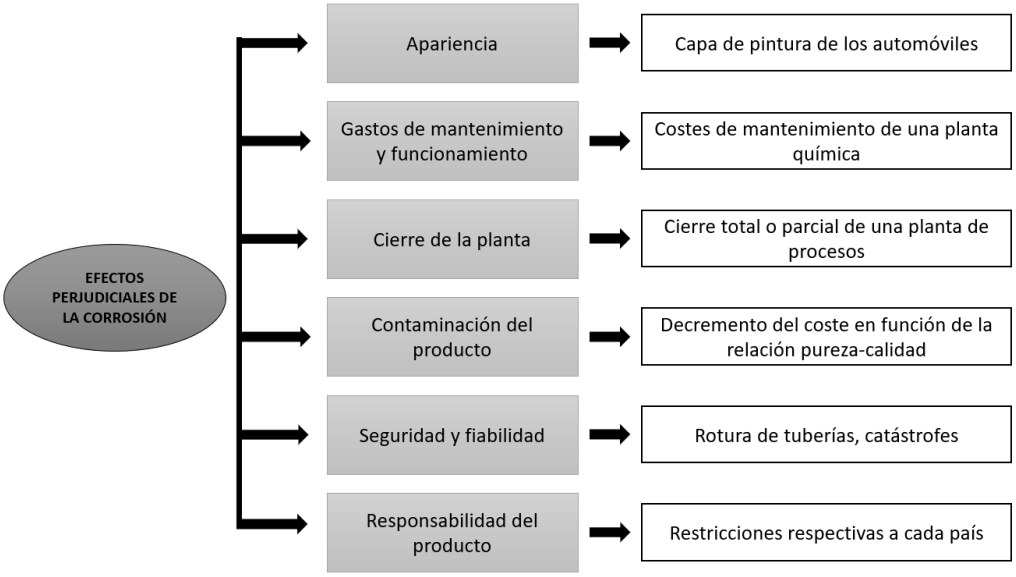


Figura 11. Efectos perjudiciales de la corrosión (Elaboración propia)

2.2.- Principio electroquímico

La corrosión se basa en el funcionamiento de una celda electroquímica. Cuando dos metales se ponen en contacto en presencia de un electrolito, se forma un circuito electroquímico, el cual está compuesto por un ánodo, que será el metal que se oxida, cediendo sus electrones de valencia, y cuyo potencial se refleja en la serie electroquímica de los metales, y por un cátodo, o sustancia que capta los electrones, reduciéndose. Para constituir la celda electroquímica es necesario que ambos estén inmersos en una solución, que facilita el tránsito iónico, que puede ser salina, permitiendo así generarse una corriente eléctrica, a través de los cambios químicos que se producen al reaccionar el metal con el medio ambiente. Una vez se disocia la sal, los cationes están listos para reducirse a metal, esta reducción se produce en el cátodo, mientras que en el ánodo se produce la reacción de oxidación, circulando los electrones por el propio metal. En definitiva, la pila de corrosión está formado por un o muchos ánodos sobre la superficie metálica, un cátodo, un circuito eléctrico y un circuito iónico [1].

En la Figura 12 se presenta la celda electroquímica, en ella se puede observar que los iones con carga negativa (aniones), se dirigen hacia el polo donde se encuentra el ánodo, mientras que los iones con carga positiva (cationes) lo hacen hacia la celda en la cual está presente el cátodo.

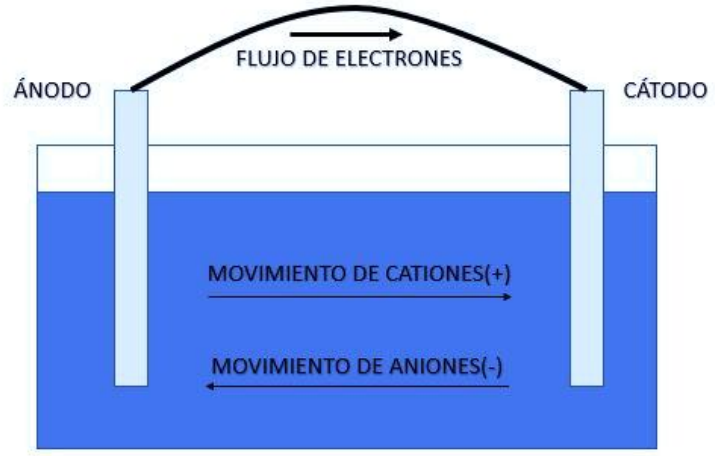


Figura 12. Celda electroquímica generadora de corriente eléctrica (Elaboración propia)

Las dos reacciones que se producen en la celda, como ya se ha mencionado anteriormente, son:

1. Reducción: Es la reacción catódica, en ella se lleva a cabo el consumo de electrones, produciendo una disminución de la carga de valencia en los iones del metal.

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M \qquad (1)$$

Ejemplo:

Reacción de reducción para una celda cuyo ánodo es el zinc y cuyo cátodo es el cobre,

$$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu \qquad (2)$$

2. Reacción de oxidación: Es la reacción anódica, aquí, a diferencia de en la reacción de reducción, se producen electrones que circulan por el metal. También se puede llamar propiamente reacción de corrosión.

$$Me \rightarrow Me^{n+} + ne^- \qquad (3)$$

Ejemplo:

Reacción de oxidación para una celda cuyo ánodo es el zinc y cuyo cátodo es el cobre,

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad (4)$$

En la Tabla 2 se definen los elementos presentes en las reacciones anteriores.

Tabla 2. Elementos presentes en las reacciones de reducción y oxidación (Elaboración propia)

Me	Metal presente en la reacción o agente reductor
Me^{n+}	Cationes del metal presentes en la reacción
M^{n+}	Cationes del metal presentes en la reacción de reducción
ne^{-}	Electrones presentes en la reacción
M	Metal presente en la reacción de reducción

En la Serie Electroquímica de los Metales, cuanto más arriba esté el material, menor potencial electroquímico tendrá, y mayor tendencia a experimentar la reacción de oxidación, tal y cómo se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3. Serie Electroquímica de los Metales [1]

Sistema	*Semirreacción*			*Potencial E°, V A 25°C*
Li^+ / Li	$Li + 1e^-$	⇌	Li	-3.045
K^+ / K	$K^+ + 1e$	⇌	K	-2.925
Cs^+ / Cs	$Cs^+ + 1e^-$	⇌	Cs	-2.923
Ba^{2+} / Ba	$Ba^{2+} + 2e^-$	⇌	Ba	-2.90
$Sr^2 + Sr$	$Sr^{2+} + 2e^-$	⇌	Sr	-2.89
Ca^{2+} / Ca	$Ca^{2+} + 2e$	⇌	Ca	-2.87
Na^+ / Na	$Na^+ + 1e^-$	⇌	Na	-2.714
Mg^{2+} / Mg	$Mg^{2+} + 2e^-$	⇌	Mg	-2.37
Al^{3+} / Al	$Al^{3+} + 3e^-$	⇌	Al	-1.66
Mn^{2+} / Mn	$Mn^{2+} + 2e^-$	⇌	Mn	-1.18
Cr^{2+} / Cr	$Cr^{2+} + 2e^-$	⇌	Cr	-0.913
V^{3+} / V	$V^{3+} + 3e^-$	⇌	V	-0.876
Zn^{2+} / Zn	$Zn^{2+} + 2e^-$	⇌	Zn	-0.762
Cr^{3+} / Cr	$Cr^{3+} + 3e^-$	⇌	Cr	-0.74
Fe^{2+} / Fe	$Fe^{2+} 2e^-$	⇌	Fe	-0.99
Cd^{2+} / Cd	$Cd^{2+} 2e^-$	⇌	Cd	-0.402
In^{3+} / In	$In^{3+} + 3e^-$	⇌	In	-0.342
Co^{2+} / Co	$Co^{2+} 2e^-$	⇌	Co	-0.277
Ni^{2+} / Ni	$Ni^{2+} + 2e^-$	⇌	Ni	-0.250
Sn^{2+} / Sn	$Sn^{2+} + 2e^-$	⇌	Sn	-0.136
Pb^{2+} / Pb	$Pb^{2+} + 2e^-$	⇌	Pb	-0.126
Fe^{3+} / Fe	$Fe^{3+} + 3e^-$	⇌	Fe	-0.036
H^+ / H_2	$2H^+ + 2e^-$	⇌	H_2	0.000
Cu^{2+} / Cu	$Cu^{2+} + 2e^-$	⇌	Cu	0.337
Hg^{2+} / Hg	$Hg^{2+} + 2e^-$	⇌	2 Hg	0.789
Ag^{2+} / Ag	$Ag^{2+} + 1e^-$	⇌	Ag	0.799
Hg^{2+} / Hg	$Hg^{2+} + 2e^-$	⇌	Hg	0.857
$Pd^{2+} Pd$	$Pd^{2+} + 2e^-$	⇌	Pd	0.987
Pt^{2+} / Pt	$Pt^{2+} + 2e^-$	⇌	Pt	1.19
Au^{3+} / Au	$Au^{2+} + 3e^-$	⇌	Au	1.50

En la Tabla 4 se presenta la Serie galvánica en agua de mar de algunos metales y aleaciones cuyo uso es frecuente. Nos sirve de ayuda para seleccionar materiales y su posible carácter anódico o catódico cuando se formen pares galvánicos, muy frecuente en uniones bimetálicas, soldaduras, atornilladas, etc. o reparaciones.

Tabla 4. Serie Galvánica (Elaboración propia)

Platino Oro Grafito Titanio Plata Acero inoxidable (pasivo) 18-8, 3%Mo Iconel (pasivo) 76%Ni-16%Cr-7%Fe Níquel (pasivo) Bronce Cobre Latón rojo Bronce al aluminio Latón amarillo Inconel (activo) 76%Ni-16%Cr-7%Fe	↑ Inactividad creciente (catódicos)
Níquel (activo) Bronce al manganeso Estaño Plomo Acero inoxidable (activo) 18-8, 3%Mo Soldadura 50-50 plomo-estaño Acero inoxidable 13%Cr Fundición Hierro forjado Hierro dulce Aleaciones de aluminio Cadmio Zinc Magnesio y aleaciones de magnesio	Inactividad creciente (catódicos) ↓

2.3.- Tipos de corrosión

La corrosión es un proceso que puede clasificarse recurriendo a diferentes criterios, por la naturaleza de la sustancia corrosiva, denominado procesos corrosivos o por la morfología del ataque, conocido como formas de corrosión.

2.3.1.- Procesos corrosivos

En primer lugar, los procesos corrosivos, clasifican la corrosión atendiendo al medio en el que se produce, es decir, dependiendo de la naturaleza de la sustancia corrosiva. Algunos métodos dividen la corrosión entre baja y alta temperatura, mientras que otros distingen entre combinacion directa u oxidación y corrosión electroquímica. Para el desarrollo del presente Proyecto Fin de Máster distinguimos entre los dos siguientes tipos [1][15]:

- Corrosión seca
- Corrosión húmeda

La corrosión seca tiene lugar en ausencia de fase líquida o por encima del punto de condensación del ambiente, cuando el material no tiene electrolito condensado (película líqiuda sobre su superficie), debido a que se encuentra sometido a la accion de gases a temperaturas elevadas. Algunos elementos en los que se produce este fenómeno son: calderas, calentadores, reactores, etc. Este proceso de corrosión se caracteriza por ser un proceso lento, siendo crítica la naturaleza conductora de la capa que se forma sobre el material, al ser encargada de transportar iones y electrones [7][21][22].

Por otro lado, la corrosión húmeda, también denominada electroquímica o a bajas temperaturas, se produce ante la presencia de un líquido, normalmente a temperatura ambiente o no muy elevada. Esto involucra soluciones acuosas o electrolitos. Es más frecuente que la corrosión seca y se puede observar en numerosos componentes, elementos y equipos, como pueden ser tanques, tuberias, carcasas, estructuras, buques, etc.

Para que la corrosion húmeda llegue a producirse son necesarios tres requerimientos [15][23]:

- La existencia de dos zonas con distinto potencial electroquímico, preciso para que el metal anódico sufra la corrosión y el metal o sustancia catódica capte los electrones.
- La presencia de un electrolito que actúe como conductor elétrico líquido, o agente corrosivo.
- La formación de una conexión conductora entre el ánodo y el cátodo, facilitada por la naturaleza conductora de los sistemas metálicos.

2.3.2.- Formas de corrosión

Es conveniente clasificar la corrosión según las formas en que se manifiesta, en función del aspecto externo que presentan las superficies afectadas y de las alteraciones que causan en las propiedades físicas del metal correspondiente. La corrosión se asocia habitualmente a la pérdida de brillo o a la formación de herrumbre, que es una capa de color rojizo, que se forma en la superficie tanto del hierro como de otros metales. La RAE define la herrumbre como el óxido del hierro. Algunas formas de corrosión dan lugar a la aparición

de grietas e, incluso, a la pérdida de ciertas propiedades físicas del metal como la resistencia mecánica o la ductilidad [1][15][24][25].

En la Figura 13 se representan las formas principales de corrosión, siguiendo la clasificación que realiza M. G. Fontana [15], en función del aspecto de las superficies afectadas, de las que se hablará a continuación.

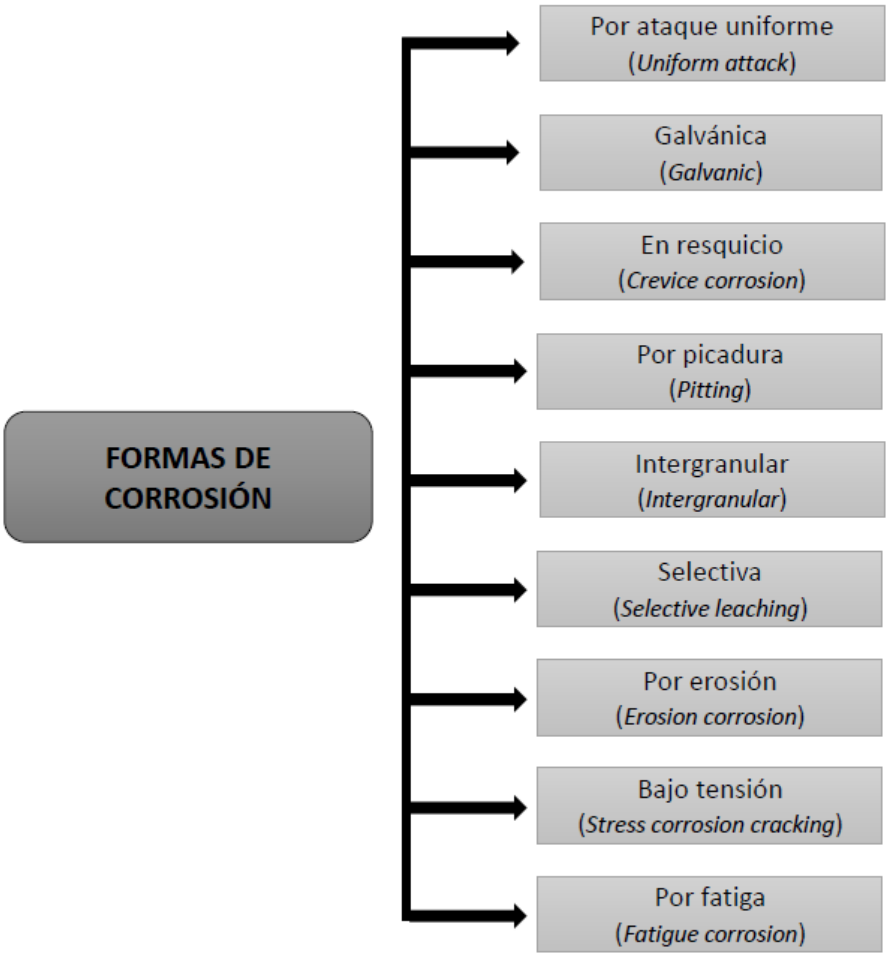


Figura 13. Formas de corrosión, clasificación según Mars. G. Fontana (Elaboración propia)

2.3.3.- Corrosión uniforme

Esta forma de corrosión es la más común, y se caracteriza principalmente por una penetración o adelgazamiento uniforme en toda la superficie metálica expuesta, como resultado de una reacción química o electroquímica que actúa sobre la misma. A menudo resulta de la exposición atmosférica, tanto a aguas dulces como saladas, o de la exposición a productos químicos [1].

Todos los metales pueden verse afectados por la corrosión uniforme, incluso los denominados materiales pasivos, como los aceros inoxidables o las aleaciones base Ni, base Ti, etc. Algunos ejemplos típicos de esta forma de corrosión es el aspecto rugoso marrón del acero Corten, la pátina verde que se forma en el cobre o el deslucimiento de la plata, los cuales pueden apreciarse en la Figura 14, siguiendo el mismo orden en el que han sido mencionados [10].

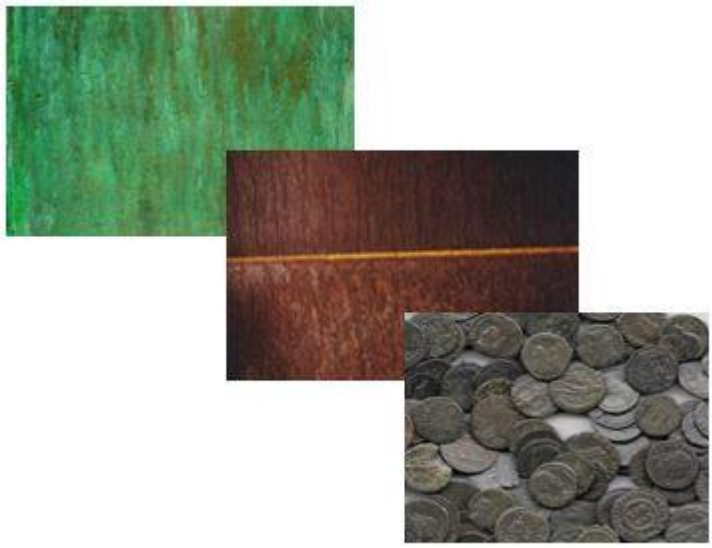


Figura 14. Ejemplos de corrosión por ataque uniforme (Elaboración propia)

Para prevenir o reducir la corrosión uniforme es imprescindible seleccionar adecuadamente de los materiales; además pueden utilizarse revestimientos o inhibidores, así como protección catódica o anódica.

2.3.4.- Corrosión galvánica

Esta forma de corrosión, conocida como corrosión galvánica, también se denomina corrosión de dos metales y ocurre cuando existe una diferencia de potencial eléctrico entre ellos. Si los dos metales están conectados eléctricamente, el metal más activo se convertirá en el ánodo de la célula galvánica y su corrosión se verá incrementada. Los tornillos de acero que se utilizan para mantener placas de cobre unidas entre sí, son objetos que presentan habitualmente esta forma de corrosión [15][26].

No toda la corrosión galvánica es perjudicial, por ejemplo, el acero recubierto de zinc o galvanizado se utiliza para proteger el acero, no porque este sea resistente a la corrosión,

sino porque el zinc, al tener carácter anódico frente al acero, se corroe perfectamente. Por lo tanto, el acero se protege catódicamente haciendo que cualquier zona expuesta se convierta en un cátodo [26].

Para que tenga lugar este fenómeno han de ocurrir una serie de condiciones necesarias, estas se recogen a continuación [5]:

- El electrolito en que están sumergidos los dos metales puede no ser agresivo, pero estar formado por una película condensada, un sólido húmedo, un depósito de sal o diferentes productos corrosivos.
- Conexión eléctrica entre los metales, bien por contacto físico directo, por un recubrimiento conductor o por un cambio en la estructura de un metal debido al trabajo que realiza.
- Reacción catódica sobre el metal más noble.

Al hablar de corrosión galvánica, no solo tenemos que hablar de materiales, en concreto de metales, sino que hay que dar la importancia correspondiente al líquido conductor que circula por ellos en procesos como puede ser la refrigeración. Los mejores materiales usados para someterse a procesos de refrigeración, sin sufrir excesivos problemas de corrosión galvánica son, el cobre, el latón y el bronce, mientras que el aluminio hay que tratar de mantenerlo alejado siempre, debido a su carácter menos noble, corrosivo, anódico [27]. En la Figura 15 se muestra una pieza de aluminio y latón, corroída galvánicamente debido a su empleo en la refrigeración líquida de un automóvil, al entrar en contacto el aluminio, más anódico y por lo tanto corrosivo, con el líquido refrigerante, la corrosión galvánica invade su superficie en un tiempo realmente breve.

Figura 15. Presencia de corrosión galvánica en una pieza de aluminio [27]

Por lo tanto, la mejor forma de prevenir la corrosión galvánica es no usando aluminio, lo ideal es mezclar metales más catódicos, utilizar agua destilada o agua pura tampoco es recomendable en refrigeración, y se recomienda reemplazar y drenar los fluidos cada año o año y medio.

2.3.5- Corrosión en resquicio

La corrosión en resquicio o *crevice corrosion*, es una forma de corrosión que se manifiesta de forma localizada en el interior de grietas u otras áreas protegidas presentes en superficies metálicas expuestas a ambientes corrosivos. Algunos de los lugares representativos, donde podemos encontrar este fenómeno son, agujeros, juntas, hendiduras, depósitos superficiales, grietas bajo las cabezas de pernos, etc. También puede denominarse esta forma de corrosión como corrosión de junta o *gasket corrosion* [15].

Se ven afectados por esta forma de corrosión tanto los metales activos como los pasivos, siendo más severa en aleaciones pasivas, concretamente aceros inoxidables. En caso de rotura de la película pasiva, velozmente ocurre la pérdida de material en dicha zona. Algunos de los elementos que favorecen la presencia de corrosión en resquicio son la arena, la suciedad y los productos corrosivos [28].

Un ejemplo de esta forma de corrosión se produce a partir del contacto del acero inoxidable con soluciones salinas aireadas, donde los productos de corrosión del Hierro, Cromo y Níquel, se acumulan en las hendiduras o resquicios y forman soluciones cloradas, muy ácidas, y que aumentan la velocidad del ataque. En la Figura 16 se muestra una

estructura afectada por la corrosión en resquicios, se trata de una brida de acero inoxidable expuesta a un medio rico en cloruros.

Figura 16. Corrosión por resquicio en una brida de acero inoxidable expuesta a un medio rico en cloruros [29]

2.3.6.- Corrosión por picadura

Este tipo de corrosión, en forma de ataque extremadamente localizado, se caracteriza por la distinta velocidad con la que se produce en las diferentes zonas del metal. Se conoce como picadura o *pitting* ya que, si la zona que actúa anódicamente es de tamaño reducido, se puede producir un ataque corrosivo profundo. Cuanto más grande sea la superficie atacada, más superficial será la corrosión [1][15][19][30]

La profundidad del ataque se mide mediante el factor de picadura o coeficiente de corrosión por picaduras, que resulta del cociente entre la máxima penetración producida y la penetración media obtenida a partir de la pérdida de peso, suponiendo una corrosión uniforme. En consecuencia, se obtendrá un factor de picadura unidad cuando el ataque producido sea uniforme [1].

$$Coeficiente\ \ de\ corrosión\ por\ picaduras = \frac{Penetración\ máxima\ en\ el\ metal}{Penetración\ media\ en\ el\ metal} \quad (5)$$

En la Figura 17 se representan los tipos de picaduras en función de la forma que presentan cuando se les realiza un corte transversal. Se recogen formas estrechas y profundas, elípticas, anchas y poco profundas, subsuperficiales o subyacentes.

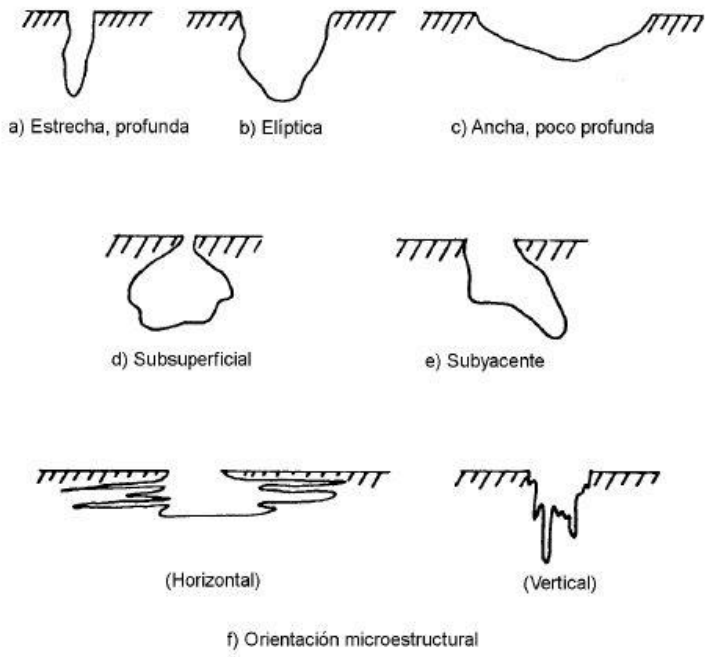


Figura 17. Forma de las picaduras a partir de un corte transversal [31]

El acero al carbono, objeto de estudio de este PFM, no presenta una capa protectora de productos de corrosión en ambiente marino, pues su tipo de ataque obedece a una corrosión generalizada. Al estar protegida con un recubrimiento, y desprenderse de forma localizada éste, el material se ataca localmente, lo que se podría asemejar a pequeñas picaduras, que van progresando conforme el recubrimiento se elimina. En casos extremos, se podría perforar todo el espesor del material, observándose este hecho en el desarrollo del actual trabajo. A modo de ejemplo, en la Figura 18 se muestra una perforación en un tramo de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, siendo este uno de los principales motivos por los que se aconseja extremar la vigilancia de los elementos que sean propensos a esta forma de corrosión.

Figura 18. Corrosión por picadura en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)

El alcance de la corrosión por picaduras es difícil de evaluar, tanto por las propias picaduras existentes como por el recubrimiento empleado en algunas ocasiones sobre las mismas. El efecto de estos recubrimientos se traduce en la aparición de ampollas en el lugar de la superficie donde se localiza la cavidad; este fenómeno es conocido como ampollamiento (*blistering*) y proviene de la pérdida de cohesión localizada debajo de la superficie. Estas ampollas pueden dar lugar a interpretaciones erróneas acerca de la gravedad de un ataque local de la corrosión, ya que debajo de éstas puede haber una cavidad importante [21][32][33].

En la Figura 19 se muestran dos elementos de acero inoxidable AISI 304 sumergidos en solución de cloruro-cuya superficie presenta corrosión por picadura.

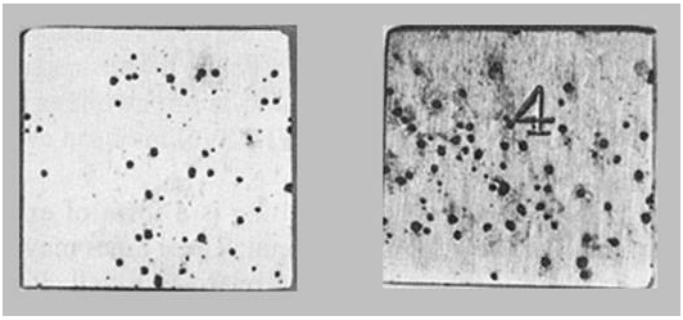


Figura 19. Presencia de picaduras en la superficie de un acero inoxidable AISI 304 [15]

Cabe destacar, que a diferencia de lo que sucediera con la corrosión uniforme, una vez iniciada la picadura, la velocidad de corrosión suele ir aumentando y son las heterogeneidades puntuales las que constituyen la causa principal del inicio de las picaduras.

2.3.7.- Corrosión intergranular

Se trata de una forma de ataque que se localiza en los límites de grano de los sistemas metálicos, debido a que éstos son, bajo ciertas condiciones, mucho más reactivos que la zona interior. El ataque corrosivo que se produce en estas zonas da lugar a la pérdida de resistencia mecánica, acompañado en algunas ocasiones del desmoronamiento de la estructura granular. En esta forma de corrosión, el ánodo es la zona intergranular, mientras que el interior del grano actúa catódicamente y dada la proximidad entre ellos, se trata de un proceso que avanza con rapidez [1].

En la Figura 20 se muestra un elemento que ha experimentado dicho fenómeno; se puede apreciar la rotura de los granos debido al rápido ataque de la corrosión. A veces, incluso los elementos y las fases llegan a precipitarse fuera de los granos, migrando a las fronteras como resultado de procesos como el envejecimiento [34].

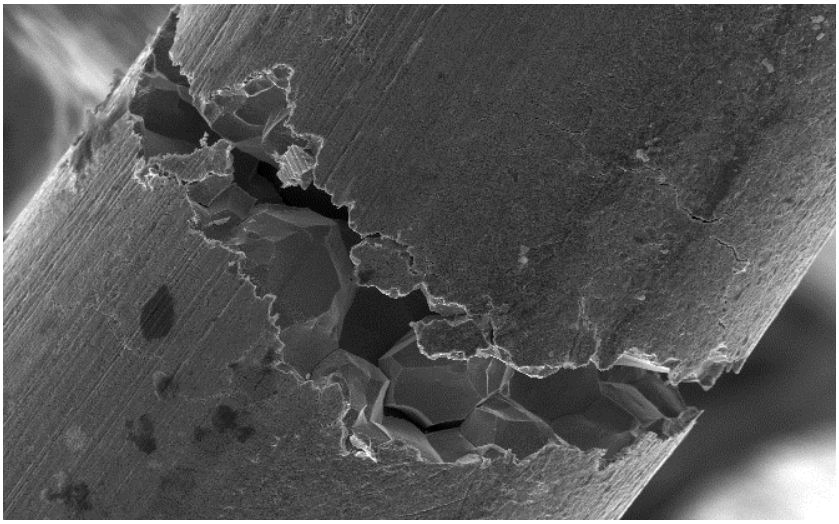


Figura 20. Corrosión intergranular [34]

La corrosión intergranular puede producirse debido a impurezas en los bordes de los granos, al enriquecimiento de uno de los elementos de la aleación o a la desaparición o agotamiento de uno de estos elementos en las zonas correspondientes a los límites de grano [15].

Los aceros inoxidables austeníticos son sistemas propensos a experimentar esta forma de corrosión. Numerosos fallos de los aceros inoxidables AISI 304 son debidos a la corrosión intergranular, cuando estos aceros se calientan en un rango entre 510ºC y 788ºC, se sensibilizan, mostrando así gran susceptibilidad ante dicho fenómeno. Como ejemplo, un procedimiento para sensibilizar intencionadamente un acero de estas características es calentarlo a 650ºC durante una hora. Existen tres métodos altamente utilizados para controlar o minimizar la corrosión intergranular del acero inoxidable austenítico [15][35][36]:

- Emplear un tratamiento térmico de solución de alta temperatura, denominado recocido en frio o enfriamiento por solución (*solution-quenching*).
- Añadir elementos formadores de carburo o estabilizadores, tales como Ti o Nb.
- Reducir el contenido de carbono por debajo de un 0,03%.

2.3.8.- Corrosión selectiva

La corrosión selectiva es la eliminación, por disolución, de un elemento de una aleación mediante procesos de corrosión. En esta forma de corrosión, el ataque ocurre preferentemente sobre uno de los elementos químicos de la aleación. Una superficie que ha sido atacada por corrosión intergranular se hace porosa, pero puede seguir manteniendo el

mismo aspecto, a excepción de un ligero empañado, y conserva su forma original, por lo que no aparenta la pérdida de propiedades, en particular mecánicas, ductilidad y de resistencia [1][15][37].

El ejemplo más comúnmente conocido es la eliminación selectiva de zinc de las aleaciones de latón, denominado *descincado* o *descincificación*. Hay dos tipos de *descinficación* y ambas son fácilmente reconocibles. La primera es uniforme o de tipo capa y la segunda es localizada [15][35][36][37].

En la Figura 21 se muestran estos dos tipos de corrosión selectiva. La imagen número uno presenta la *descincificación* uniforme de un tubo de latón, mientras que la número dos representa la *descincificación* localizada.

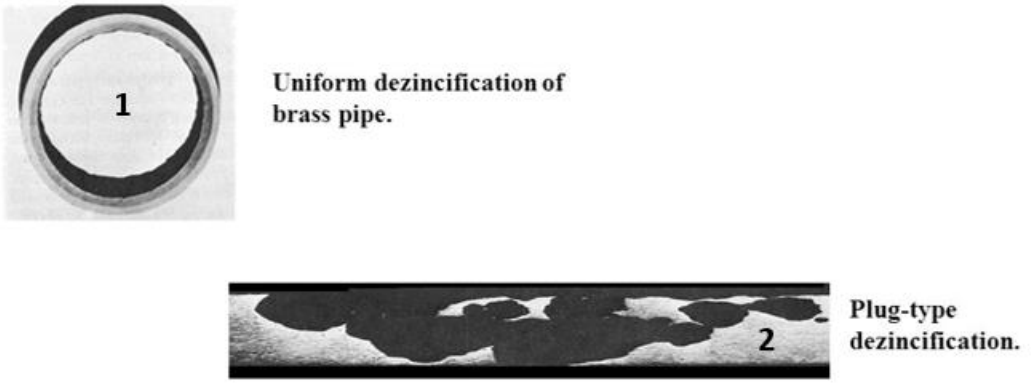


Figura 21. Corrosión selectiva uniforme (1) y localizada (2) [15]

2.3.9.- Corrosión por erosión

La corrosión por erosión es la aceleración o el aumento del deterioro de un metal debido al movimiento relativo del fluido corrosivo respecto a la superficie del metal. Por lo general, este movimiento es bastante rápido y produce efectos de desgaste mecánico o abrasión. La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión es difícil de establecer, y varía de una situación a otra, generalmente el mecanismo que provoca la erosión se atribuye a la separación de películas protectoras superficiales, como pueden ser las películas de óxido que se forman por el aire o por productos adherentes a la corrosión [15] [35][36][37][38].

Esta forma de corrosión se manifiesta en forma de surcos, hoyos pequeños o agujeros redondeados y muestra un patrón direccional. Suele presentarse en tuberías, hélices, álabes de turbinas, válvulas, bombas, etc. [15].

En la Figura 22 se observa una representación esquemática de los pasos en el fenómeno de corrosión por erosión.

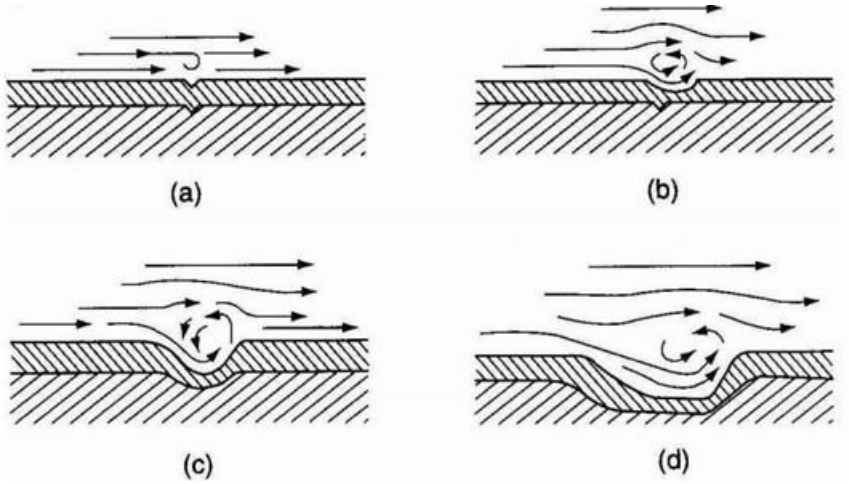


Figura 22. Corrosión por erosión [25]

Una forma especial de corrosión por erosión es la cavitación, fenómeno causado por la formación y el colapso de burbujas de vapor en un líquido cercano a una superficie metálica. Estas burbujas son capaces de arrancar partículas de su superficie, formando así agujeros y picaduras. Se produce cavitación en las áreas donde la velocidad del fluido, acompañada de bajos niveles de presión, hace aparecer disminuciones locales de presión, dando estas lugar a la vaporización del fluido [1][15][39][40].

En la Figura 23 se muestra una hélice que presenta esta forma de corrosión, también presentan cavitación los impulsores de bombas o los propulsores sumergidos.

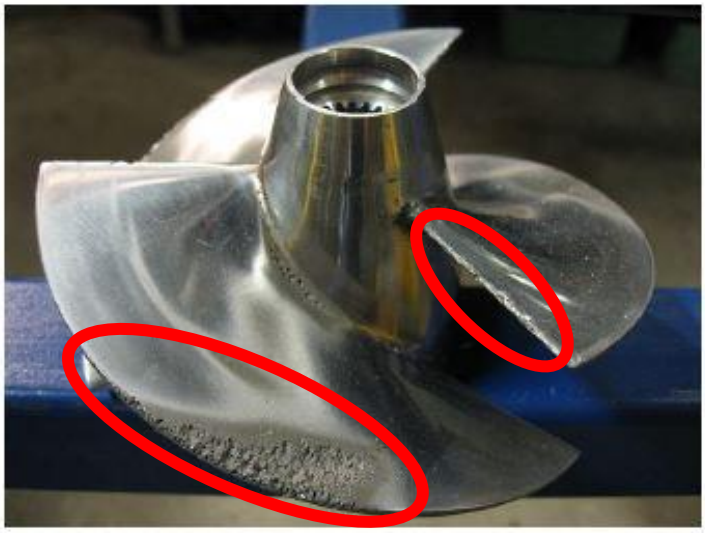


Figura 23. Hélice corroída por cavitación [25]

Cabe destacar cinco métodos usados para prevenir o reducir el daño debido a la erosión. En orden de importancia, son los siguientes [15]:

1) Materiales con mayor resistencia a la corrosión.
2) Mejoras en el diseño, implica construcción y mano de obra adecuadas.
3) Alteración del entorno, desgasificación y uso de inhibidores.
4) Aplicación de revestimientos.
5) Protección catódica.

2.3.10.- Corrosión bajo tensión

La corrosión bajo esfuerzos de tensión, o fractura por corrosión (*Stress Corrosion Cracking*), es el proceso químico a partir del cual, metales sometidos a esfuerzos mecánicos y de forma simultánea expuestos a ambientes corrosivos, presentan fatiga estructural que da lugar a la aparición de fisuras y grietas dada la disminución de su resistencia [38][41].

Esta forma de corrosión resulta muy engañosa y al mismo tiempo peligrosa, no se suelen observar grandes superficies afectadas, debido a que las grietas que se forman aparentan ser superficiales, pero se caracterizan por ser de contextura fina pero muy profunda, lo cual da lugar a un alto riesgo de fractura [32][38][38].

En la Figura 24 se muestra un esquema del proceso de corrosión bajo tensión, en cada punta de la grieta, dada la acción combinada de la tensión de tracción con los iones específicos, se da una propagación continua de la grieta. Las roturas siguen una forma irregular y ramificada.

Figura 24. Esquema SCC [41]

Algunos elementos que sufren esta forma de corrosión son las aleaciones de cobre, como los latones en ambientes amoniacales, o el acero inoxidable [26].

También se ha de tener especial cuidado con los siguientes compuestos:

- Aleación de aluminio en disoluciones de NaCl.
- Aceros al carbono en agua de mar, disoluciones base NaOH, disoluciones ácidas.

En la Tabla 5 se pueden observar situaciones propicias a originar corrosión bajo tensión en metales y aleaciones[10][42][43] .

Tabla 5. Ejemplos de situaciones en las que los metales y aleaciones sufren corrosión bajo tensión (Elaboración propia)

MATERIAL	AMBIENTE	MATERIAL	AMBIENTE
Aleación de aluminio	Disoluciones de NaCl-H_2O_2 Disoluciones de NaCl Agua de mar Aire, vapor de agua	Aceros ordinarios	Disoluciones de Disoluciones de NaOH-Na_2SiO_3 Disoluciones de nitratos de calcio, amonio y sodio Mezcla de ácidos Disoluciones de HCN Disoluciones ácidas de H_2S Agua de mar Aleaciones de Na-Pb fundidas
Aleación de cobre	Vapores y disoluciones de amoniaco Aminas		
Aleación de oro	Agua, vapor de agua Disoluciones de $FeCl_2$ Disoluciones de sales de ácido acético	Aceros inoxidables	Disoluciones de ácido-cloruro Disoluciones de NaCl-H_2O_2 Agua de mar H_2S Disoluciones de NaOH-H_2S Vapor condensado en aguas cloradas
Inconel	Disoluciones de sosa cáustica		
Plomo	Disoluciones de acetato de plomo		
Aleación de magnesio	Disoluciones de NaCl-K_2CrO_2 Ambientes rurales y costeros Agua destilada		
Monel	Sosa cáustica fundida Ácido fluorhídrico Ácido fluosilícico	Aleaciones de Titanio	Ácido nítrico fumante Agua de mar N_2O_4, metanol_HCl
Níquel	Sosa cáustica fundida		

2.3.11.- Corrosión fatiga

La rotura de los metales sometidos a un esfuerzo mecánico repetitivo de forma periódica en un entorno corrosivo, se denomina corrosión fatiga (CF), y produce una disminución significativa de la resistencia del material o estructura [38][44][42].

Esta forma de corrosión se observa a menudo en el agua, agua salada, las soluciones ácidas, etc., y puede tener lugar en el aire. La humedad del aire se condensa habitualmente en las superficies metálicas, especialmente en los fondos de las grietas debido a los cambios en el punto de rocío, la condensación capilar, etc., dando lugar a la CF. El oxígeno, la

humedad del aire y la adsorción de otros gases, disminuyen la resistencia a la fatiga, aunque no den lugar a condensación [38][44][45].

Algunos de los elementos en los que está muy presente la corrosión por fatiga son las palas de turbinas de vapor, en la Figura 25 se muestra este fenómeno.

RE

Figura 25. Corrosión fatiga en la pala de una turbina [46]

2.3.12.- Corrosión atmosférica, y causada por aguas y por suelos

La atmósfera, el agua y el suelo son tres factores determinantes en cuanto a estudio de la corrosión y la protección por medios orgánicos frente a ésta, por lo que se ve preciso, dada la temática del PFM, detallarlas a continuación.

CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica transcurre dado un mecanismo de naturaleza electroquímica. Cuando un metal parece estar mojado se debe a que el electrolito está constituido por una película de humedad o película acuosa. Bajo dicha película, la mayoría de los metales se corroen por medio del proceso catódico de reducción de oxígeno.

El proceso de corrosión atmosférica es la suma de procesos parciales de corrosión propiciados cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas, lluvia, nieve o niebla, y la condensación por cambios de temperatura, son los principales causantes de la corrosión en la atmósfera [6][16][47][48].

No solo la humedad y la temperatura son factores ambientales a tener en cuenta, sino también el contenido de partículas de diferentes impurezas las cuales actuarán como núcleos de condensación, llamados agentes agresivos [5].

De los factores mencionados, está demostrado que el que ejerce un papel más decisivo en la corrosión atmosférica es la humedad relativa (HR). Por debajo de un umbral de HR no se da la corrosión, no existe película apreciable de electrolito sobre el metal. Normalmente, la corrosión del hierro y de otros metales es insignificante a humedades relativas inferiores al 60-70%. Y, además, aún por encima de estos niveles, la atmósfera ha de estar contaminada para que la velocidad de corrosión alcance valores importantes [16].

Entre los factores externos que determinan la intensidad de la corrosión atmosférica destacan los siguientes[16]:

a) La vida de la película de electrolito de la superficie del metal.
b) La composición química de la atmósfera.
c) La temperatura ambiente.

En la Figura 26 se observa la corrosión de Fe en aire con 0.01% SO_2, para un elemento expuesto durante 55 días [5]. La velocidad a partir de la cual la corrosión experimenta un aumento importante se conoce como humedad crítica.

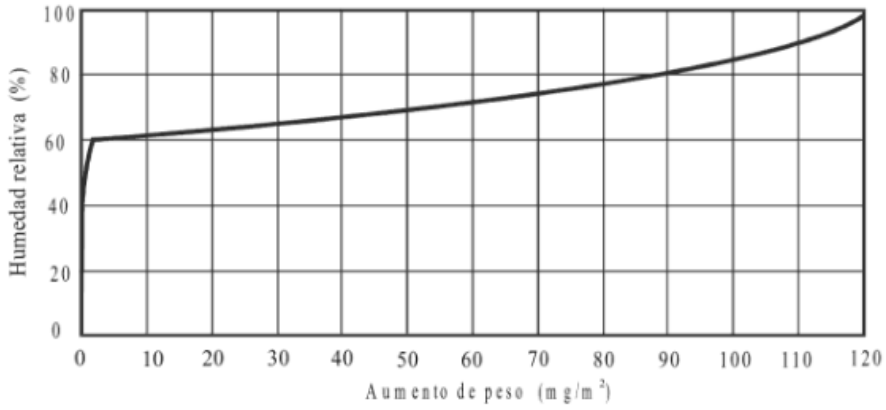


Figura 26. Corrosión de Fe en aire con 0.01% SO_2 [5]

Los contaminantes que más afectan en la corrosión atmosférica son SO_2 y Cl^-, siendo el componente más corrosivo el primero, aunque su acción depende siempre del contenido de humedad [5][16][23].

Las atmósferas pueden variar mucho en función de la humedad, temperatura, contaminantes, por lo que las velocidades de corrosión atmosférica cambian

considerablemente de unos lugares a otros. Estas diferencias en la corrosividad aconsejan clasificar las atmósferas en cuatro tipos diferentes; marinas, industriales, urbanas y rurales [5][6][16][47][48].

La corrosión en estructuras sumergidas en agua, dependen principalmente del tipo de agua- dulce, salobre o salina – que en función de su contenido de oxígeno influyen en mayor o menor medida sobre las mismas. Una estructura sumergida en agua no sólo es aquella que está permanentemente inmersa, también se han de tener en cuenta superficies en las que el nivel de agua varía, llegando incluso a estar ésta totalmente al aire, provocando un incremento de la corrosión debido al impacto combinado de agua y la atmósfera. Este es uno de los casos a estudiar en el desarrollo del presente Proyecto, concretamente en las Zonas de Estudio 2 y 3, en donde el agua del mar incide sobre la barandilla de la Playa del Sardinero con alta frecuencia. Por último, se han de tener en cuenta también las zonas mojadas o pulverizadas por las olas, caso concreto de la Zona de Estudio número 1 [5] [6][16][47][48].

En cuanto a las estructuras subterráneas, la corrosión depende del contenido mineral del suelo y de su naturaleza; el contenido de oxígeno variará dando lugar a la presencia de células de corrosión en función del grado de aireación. Las grandes estructuras de acero tales como tuberías, túneles, tanques, etc., pasan a través de diversos tipos de tierra, por lo que son zonas propensas a sufrir este tipo de fenómenos [47][48][49].

Las categorías de la corrosividad atmosférica recogidas en la Norma ISO 9223 [50] son las siguientes:

C1 corrosividad muy baja

C2 corrosividad baja

C3 corrosividad media

C4 corrosividad alta

C5 corrosividad muy alta

CX corrosividad extrema

En la Tabla 6 se muestran estas categorías junto con los ambientes habituales en los que se desarrolla cada una de ellas, y los valores de pérdida de espesor y masa debido a la corrosión atmosférica, además de ejemplos de ambientes típicos en un clima templado, como es el de la ciudad de Santander. [26][51].

Tabla 6. Categorías de corrosividad atmosférica [51]

CATEGORÍA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA Y EJEMPLOS DE AMBIENTES TÍPICOS

Categoría de corrosividad	Pérdida de masa por unidad de superficie/pérdida de espesor (tras el primer año de exposición)				Ejemplos de ambientes típicos en un clima templado (solamente informativo)	
	ACERO DE BAJO CONTENIDO EN CARBONO		CINC		EXTERIOR	INTERIOR
	Pérdida de masa g/m²	Pérdida de espesor µm	Pérdida de masa g/m²	Pérdida de espesor µm		
C1 muy baja	≤10	≤1,3	≤0,7	≤0,1		Edificios con calefacción y con atmósferas limpias, por ejemplo: oficinas, tiendas, colegios, hoteles.
C2 baja	>10 y hasta 200	>1,3 y hasta 25	>0,7 y hasta 5	>0,1 y hasta 0,7	Atmósferas con bajos niveles de contaminación. Áreas rurales en su mayor parte.	Edificios sin calefacción donde pueden ocurrir condesaciones, por ejemplo: almacenes, polideportivos.
C3 media	>200 y hasta 400	>25 y hasta 50	>5 y hasta 15	>0,7 y hasta 2,1	Atmósferas urbanas e industriales, con moderada contaminación de dióxido de azufre. Áreas costeras con baja salinidad.	Naves de fabricación con elevada humedad y con algo de contaminación del aire, por ejemplo: planta de proceso de alimentos, lavanderías, plantas cerveceras, plantas lácteas.
C4 alta	>400 y hasta 650	>50 y hasta 80	>15 y hasta 30	>2,1 y hasta 4,2	Áreas industriales y áreas costeras con moderada salinidad.	Plantas químicas, piscinas, barcos y astilleros.
C5-I muy alta (industrial)	>650 y hasta 1.500	>80 y hasta 200	>30 y hasta 60	>4,2 y hasta 8,4	Áreas industriales con elevada humedad y con atmósfera agresiva.	Edificios o áreas con condesaciones casi permanentes, y con contaminación elevada.
C5-M muy alto (marino)	>650 y hasta 1.500	>80 y hasta 200	>30 y hasta 60	>4,2 y hasta 8,4	Áreas costeras y marítimas con elevada salinidad.	Edificios o áreas con condesaciones casi permanentes, y con contaminación elevada.

CORROSIÓN POR DIFERENTES TIPOS DE AGUAS

Todas las aguas que contactan con sistemas metálicos, en todos los sectores industriales, derivan o del agua de mar o del agua de la lluvia, por lo que pueden presentar composiciones químicas muy diferentes. Cuando se trata con agua de mar, los factores más importantes en relación con la corrosión son, el grado de polución y/o la dilución debida a su flujo en los ríos, y el contenido de oxígeno disuelto. En caso de tratarse de agua de lluvia, su composición depende de los terrenos por los que pasa, previo a parar en el rio, lago o depósito. Como ejemplo, el contenido de $CaCO_3$ de un agua dura puede ser 20 veces mayor que el de un agua dulce. No hay que olvidar la agresividad de aguas estancadas o poco renovadas, puesto que pueden inducir un fenómeno denominado corrosión microbiológica [5][52].

CORROSIÓN POR SUELOS

Es verdaderamente importante tener en cuenta la corrosión de estructuras enterradas, sobre todo en el caso de tuberías, donde el coste del control de la corrosión es del 1-2%del coste total. Las velocidades de corrosión en tierras varían mucho según la clase de suelo. Es por esto por lo que un metal puede comportarse de manera satisfactoria en unas regiones y en otras no, debido a la composición del suelo, el pH, el contenido de humedad, etc.[5] [7][12].

Los factores más importantes que afectan la corrosividad de los suelos son los siguientes [5] [7][12][53]:

- Porosidad
- Conductividad
- Humedad, sales disueltas, pH
- Microorganismos

Para el agua y el suelo, estructuras sumergidas o enterradas, la corrosión y sus categorías son difíciles de definir. En la norma UNE-EN ISO 12944-2:2018 [26][54] se recogen cuatro categorías para definir estas situaciones, presentadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorías para clasificar la corrosión en agua y tierra [26]

Categoría	Ambiente	Ejemplos de ambientes y estructuras
Im1	Agua dulce	Instalaciones en ríos, plantas generadoras hidro-eléctricas
Im2	Mar o agua salobre	Estructuras sumergidas sin protección catódica (por ejemplo, áreas portuarias con estructuras como diques, compuertas o embarcaderos)
Im3	Tierra	Tanques enterrados, pilas de acero, tuberías de acero
Im4	Mar o agua salobre	Estructuras sumergidas con protección catódica (por ejemplo, estructuras en ultramar)
NOTA Para la categoría de corrosividad Im1 y Im3, se puede utilizar la protección catódica con un sistema de pintura ensayado de manera acorde.		

2.4.- Control y protección de la corrosión

En la actualidad, aproximadamente más de la tercera parte de la producción mundial de acero es destinada a reponer todo los componentes o equipos que se destruyen por la acción de este peligroso fenómeno. No solo el gran impacto económico de las pérdidas ocasionadas por la corrosión afecta mundialmente, sino que su repercusión directa sobre la seguridad de los elementos y los sistemas mecánicos es algo a tener muy en cuenta en todo el planeta. Cabe destacar la necesidad de mejorar el conocimiento y los estudios acerca de

las distintas medidas preventivas adecuadas y rentables, evitando una excesiva focalización en los medios para corregir los síntomas y dándole más importancia a averiguar las causas de los fallos [1][55].

Desde la antigüedad se vienen poniendo en práctica medidas contra la corrosión a partir del uso de recubrimientos protectores, como pueden ser las pinturas, los aceites, el estañado o el galvanizado. Todos los métodos de protección frente a la corrosión tienen como finalidad alargar la vida útil de los materiales, siendo muchas veces imposible eliminar totalmente la corrosión, pero permitiendo así proteger, controlar y mejorar sustancialmente la fiabilidad de su servicio [1][55].

Generalmente, se denomina protección anticorrosiva al conjunto de acciones o actos que involucran la protección de una estructura metálica frente a este proceso de degradación llamado corrosión. La protección incluye el tipo de superficie, el análisis del ambiente, las condiciones de trabajo, las posibilidades de acceso a los lugares donde se encuentra la estructura, la preparación de la superficie, el esquema de protección y el método de aplicación [55].

Las tres fases determinantes de la vida útil de un elemento o sistema mecánico son las siguientes [1]:

- Fase de diseño
- Fase de construcción
- Fase de explotación o uso

Para ejercer un buen control de la corrosión en las estructuras, se combinan los distintos tipos de protección más empleados, destacando la protección anódica y complementándolo con un buen recubrimiento pasivo [55].

A continuación, se enumeran algunos de los métodos de protección más frecuentemente empleados frente a la corrosión [1][5][12][15][56]:

1. Selección adecuada de los materiales

Una correcta selección del material a utilizar, con el fin de adecuarlos a la aplicación y al medio en el que estarán expuestos, forma parte del paso previo a cualesquiera otros métodos protectores a emplear. No existe ningún material que sea capaz de resistir bien la corrosión en cualquier medio, lo que quiere decir que siempre habrá algún medio que sea altamente corrosivo para dicho material, a excepción de los metales nobles. Estos metales,

también denominados preciosos, son muy blandos, muy resistentes a la corrosión y muy caros. Algunos de los más conocidos son el oro, la plata o el platino [57].

Antes de elegir el material con el que se va a trabajar, es estrictamente necesario prever los efectos de las operaciones y los tratamientos a los que se verá sometido. Como ejemplo se encuentran las soldaduras; éstas pueden añadir efectos adversos en cuanto a sensibilidad y provocar la desprotección de la zona donde se aplican.

2. Modificación del diseño

Con el fin de prevenir los problemas de corrosión que se puedan presentar en un elemento o sistema mecánico, han de tenerse en cuenta una serie de consideraciones o modificaciones a realizar en el proyecto [56].

- Utilización de diseños sencillos.
- Evitar irregularidades como pueden ser los bordes, las esquinas y las superposiciones.
- Uniones mediante soldadura continua, evitando el uso de tornillos y remaches.
- Evitar las soldaduras discontinuas, utilizarlas solo en caso de un riesgo de corrosión totalmente insignificante.

En la Figura 27 se muestra la situación actual de una unión soldada presente en la Barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, cuyo aspecto denota un elevado grado de deterioro ocasionado por la corrosión.

Figura 27. Aspecto unión mediante soldadura correspondiente a la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)

3. Modificación del medio corrosivo

Para evitar la aparición del fenómeno de corrosión, es necesario tener en cuenta el medio en el que se encuentra el material. Se ha de tener presente la naturaleza de éste y el estado en el que se encuentra, bien sea gaseoso, líquido o sólido. Algunas recomendaciones a tener en cuenta para reducir los efectos del medio sobre la corrosión son las siguientes [1][12][56]:

- Reducción de la temperatura del medio: Hay que tener especial cuidado con el empleo de este método pues podría resultar contraproducente.
- Disminución de la velocidad del fluido: El fluido estacionario suele ser menos agresivo.
- Reducción de la cantidad de oxígeno en agua: Cuanto mayor es la concentración de oxígeno, más favorecido resulta el proceso corrosivo.
- Reducción de la concentración de iones agresivos: A menor presencia de éstos, menos opciones de corrosión.

- Reducción de la humedad relativa del agua o del aire: Con este método se consigue evitar la presencia de una película húmeda.
- Empleo de inhibidores: Se considera este el método más importante en cuanto a la reducción de la corrosión a través de la modificación del medio se refiere, por lo que son sustancias retardadoras de la corrosión. Se clasifica este método en función de su mecanismo de actuación; inhibidores anódicos, catódicos, mixtos e inhibidores de adsorción.

4. Modificación de las diferencias entre los potenciales del metal y el medio corrosivo

Existen dos tipos de protección a partir de la modificación de potenciales: la protección catódica y la protección anódica [1][12][56]:

1. Protección catódica:

   Se trata de uno de los métodos más efectivos de protección contra la corrosión. La protección catódica se basa en proporcionar al metal inmunidad contra este fenómeno y puede realizarse mediante ánodos de sacrificio, que consiste en unir eléctricamente el metal a proteger con otro metal cuyo potencial de reducción sea más negativo, o por corriente impresa, en la cual se le suministra corriente continua externa dotando al metal a proteger de una superficie equipotencial. En definitiva, impulsar a que se ubique el sistema metálico en la zona de inmunidad, sin tendencia a oxidarse.

2. Protección anódica:

   Algunos metales, como el titano, el cromo, el aluminio, el berilio, el cadmio, el hierro y el níquel, tienen una tendencia alta a pasivarse cuando se someten a un potencial más positivo que el de corrosión, ralentizándose el proceso corrosivo. En los metales que se pasivan, sobrepasado un cierto valor de potencial, conocido como potencial de pasivación, y una densidad de corriente, denominada densidad de corriente de pasivación, se forma una capa de producto altamente protectora que hace descender

la densidad de corriente hasta el punto de suponer una velocidad de corrosión muy pequeña.

5. Empleo de recubrimientos protectores

Con el paso del tiempo y el avance de la tecnología se han ido desarrollando nuevas técnicas y productos de protección frente al fenómeno de la corrosión. Los recubrimientos aplicables sobre las superficies metálicas se pueden clasificar en tres grandes grupos [1][12][56]:

1. Recubrimientos metálicos, entre los que cabe destacar los siguientes:

   El galvanizado electrolítico, se realiza mediante deposición del metal en un baño electrolítico acuoso.

   La inmersión en caliente, trata de sumergir un breve periodo de tiempo el material en un baño de metal fundido.

   La metalización por proyección, consiste en proyectar sobre la superficie gotas de metal fundido mediante un chorro de aire, estas gotas formarán una capa porosa y adherente.

   La cementación, introduciendo el material a proteger dentro de un tambor rotatorio junto con una mezcla de polvo de metal que actuara como recubrimiento.

   La reacción en fase gaseosa, consiste en formar sobre la superficie a proteger una película de producto protector al ponerla en contacto con compuestos volátiles a temperaturas elevadas.

   El recubrimiento por plasma, o deposición química de vapor asistida por plasma (PECVD), una de las técnicas más novedosas, permite utilizar el plasma para crear una capa ultrafina de recubrimiento, ayudando a mejorar la superficie de forma permanente, convirtiéndola en apta para nuevas aplicaciones y dándole un carácter hidrofóbico o hidrófilo, resistente a los rayones o la corrosión [58][59].

2. Recubrimientos inorgánicos:

Destacan entre ellos el esmaltado vítreo, los recubrimientos a base de cemento y el recubrimiento mediante óxidos del metal a proteger, como puede ser el anodizado.

3. Recubrimientos orgánicos:

Desde el punto de vista cuantitativo, son considerados el principal tipo de recubrimiento. A modo de ejemplo, en Estados Unidos el gasto en pinturas y lacas superaba, hace ya 15 años, la cifra de los 100.000 millones de dólares [18].

Esta es la forma más versátil de protección frente a la corrosión, excepto cuando tratamos con temperaturas muy altas. Su uso es el más generalizado, y un ejemplo de ello es la utilización de uno de estos recubrimientos en la barandilla de la Playa del Sardinero II con la que hemos trabajado durante la realización de este Proyecto; así, se explica con detalle en el siguiente apartado.

En la Figura 28 se muestra a modo de resumen un diagrama de flujo del diseño de un componente estructural, teniendo en cuenta todas las opciones técnicas básicas de protección contra la corrosión y la optimización de los costes [12].

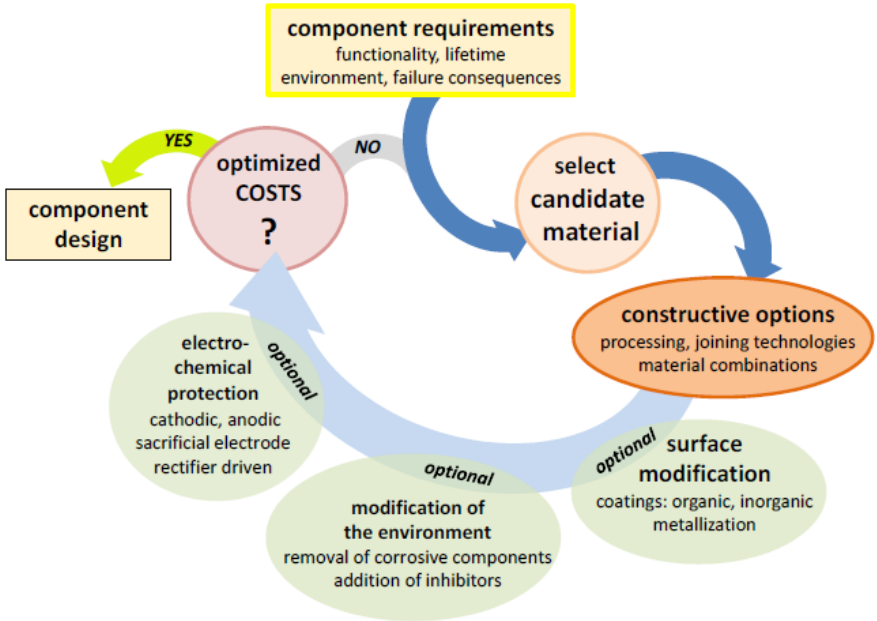


Figura 28. Diagrama de flujo diseño componente estructural y protección frente a la corrosión [12]

2.4.1.- Protección frente la corrosión por empleo de recubrimientos orgánicos: Pinturas

La protección de las superficies tiene doble misión: establecer una barrera entre el material a proteger y el agente agresivo, y aumentar la resistencia eléctrica del medio. Los productos orgánicos cumplen con creces esta finalidad pues son compuestos con constantes dieléctricas bajas [5][55][60].

Los dos procedimientos de protección más utilizados son el revestimiento con planchas de 2-4 mm de espesor y el revestimiento con pinturas. Antes de aplicar un método de protección ha de plantearse la siguiente pregunta: ¿cuándo se utilizará una pintura y cuándo un revestimiento de determinado espesor? [5].

Las pinturas anticorrosivas están constituidas por componentes químicos básicos, como el silicato de sodio (inhibidor de la corrosión) y el ácidoetilendiaminotetraacético, EDTA (secuestrante activo). Su principal función es proteger al acero -y otros metales como el hierro-, para lo cual, además de incrustarse en la superficie, reaccionan químicamente modificándola y compenetrándose con ella [55].

A la hora de aplicar una pintura, ha de tenerse en cuenta que, a pesar de que la resina que la forma resiste bien el medio agresivo, es muy complicada aplicarla de forma uniforme y, ni siquiera empleando varias capas, podemos estar seguros de evitar porosidades. En las siguientes condiciones, no podemos confiar en que la utilización de la pintura como método de protección, sea eficaz [5][55]:

- Agentes muy agresivos
- Temperaturas elevadas
- Abrasión-corrosión
- Necesidad de cierta resistencia mecánica
- Vida útil de la pieza superior a 15 años

En estos casos es necesario aislar por completo el medio agresivo del soporte que recibe el ataque.

La preparación de la superficie es fundamental y debe prestarse la atención que merece pues, la mayor parte de los problemas que provienen de los revestimientos son de adherencia, y esta está altamente ligada con el estado de la superficie sobre la cual se aplican.

En la Tabla 8 se muestra la vida útil de un elemento en función de la preparación de su superficie y de las capas de acabado que se le han proporcionado, y basada en los estudios realizados por Bilurbina et al. [5].

Tabla 8. Efecto de la preparación de las superficies (Elaboración propia)

Preparación de la superficie	Dos capas de imprimación alquídica de minio de plomo y dos capas de acabado alquídico (espesor total 120 µm)	Dos capas de acabado alquídico (espesor total 50 µm)
Calamina intacta	8,2 años	3 años
Cepillado	2,3 años	1,2 años
Decapado ácido	9,5 años	4,6 años
Arenado	10,4 años	6,3 años

La protección mediante pinturas, como se explica anteriormente, es el método más versátil y extendido en cuanto a protección de materiales metálicos se refiere. La pintura se puede definir como un fluido pigmentado cuya principal característica es la de extenderse en una capa de pequeño espesor sobre cualquier superficie y que, por un proceso físico o físico-químico, se solidifica, dando lugar a una película sólida y opaca que se adhiere a la superficie del material que se está tratando [5][55][61][62].

Está formada por:

- Vehículo. Es la parte líquida de la pintura y se compone de ligante más disolvente.
- Pigmento. La parte sólida del recubrimiento orgánico, formada por partículas sólidas muy finas que se mantienen insolubles y dispersadas, en estado de suspensión.
- Aditivos. Estos productos se añaden, en pequeñas cantidades, para conseguir propiedades secantes, catalizadores, antiespumantes, etc.

Los aceros al carbono o de baja aleación, sin recubrir, desnudos, expuestos a la atmósfera, al agua o enterrados, están sometidos al fenómeno de corrosión pues su capa ofrece pocas propiedades protectoras. Para asegurar un sistema de protección efectivo, los propietarios de las estructuras, planificadores, consultores, inspectores y fabricantes de materiales de recubrimiento han de tener a su disposición la información, totalmente

actualizada, sobre los sistemas de pintura anticorrosiva. La Norma ISO 12944 es la encargada de ofrecer esta información [49].

En la Figura 29 recogen los distintos campos de aplicación de esta norma, junto con los factores que influyen en la selección en cada uno de ellos. Este esquema se basa en las pautas recogidas en la Norma UNE-EN ISO 12944 [61].

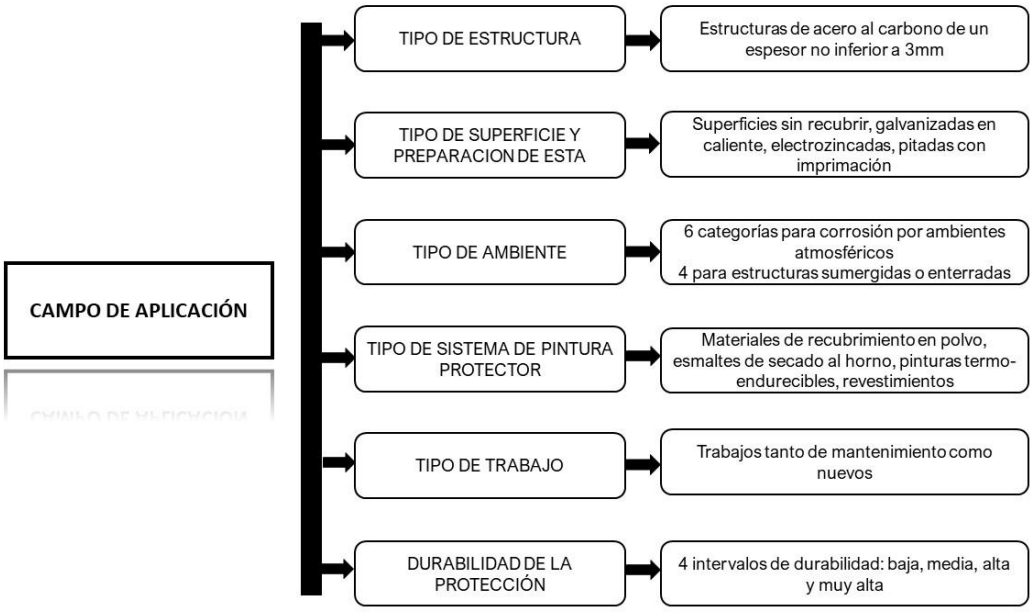


Figura 29. Campo de aplicación Normas ISO 12944 (Elaboración propia)

Dentro de estos campos de aplicación, destacan como factores más importantes a la hora de seleccionar la pintura, las condiciones ambientales (recogidos sus distintos grados y clasificación en el Apartado 2.3.12, el tipo de superficie a proteger y la durabilidad requerida.

La preparación superficial, es decir, el estado que presenta el material previo al acondicionamiento adquiere gran importancia a la hora de elegir el sistema de pintado, como se ha mencionado con anterioridad. En la Norma ISO 8501 se identifican cuatro niveles, denominados grados de oxidación, que se aprecian normalmente en superficies de acero no revestido [62]. En la Figura 30 se muestran cuatro patrones fotográficos correspondientes a los grados de oxidación mencionados, que hacen referencia a situaciones iniciales previas al tratamiento del material.

Figura 30. Grados de oxidación recogidos en la Norma ISO 8501 (Elaboración propia)

Los materiales metálicos no pueden ser simplemente pintados como acción anticorrosiva, es de estricta necesidad una preparación previa, acción que muchas veces no se tiene en cuenta y que provoca, en numerosas ocasiones, un fallo de la estructura mucho antes de lo previsto, atendiendo a su vida útil de diseño. Sin preparación previa, el efecto del material protector, en este caso la pintura, y su durabilidad, pierden todo su efecto. Algunos de los tratamientos previos más utilizados a la hora de aplicar recubrimientos orgánicos son:

- El chorreado abrasivo
- La limpieza manual o por medios mecánicos
- La limpieza por llama o flameado
- La limpieza con agua a presión
- El decapado químico

En cuanto a la durabilidad requerida, es decir el periodo de tiempo que pasa hasta que sea necesario realizar el primer mantenimiento de la estructura tras la aplicación de la pintura, la norma UNE-EN ISO 12944-1 [54] especifica tres intervalos. Éstos dependen de varios parámetros como, son el tipo de sistema de pintura, el diseño de la estructura, la condición del substrato previo a la preparación, el grado de preparación superficial, la condición de las juntas, bordes y soldaduras, la calidad del trabajo de aplicación, las condiciones durante el proceso de aplicación y las condiciones posteriores [61][63].

En la Tabla 9 se esquematizan estos intervalos junto con los años que pueden resistir sin un primer mantenimiento.

Tabla 9. Clasificación de la durabilidad en tratamiento orgánicos (Elaboración propia)

CLASIFICACIÓN	DURABILIDAD
Baja (L)	2 a 5 años
Media (M)	5 a 15 años
Alta (H)	Más de 15 años

A continuación, se describen los tipos de pintura y los métodos de aplicación de dicho recubrimiento orgánico.

TIPOS DE PINTURA

Son varias las formas en que se pueden clasificar los recubrimientos orgánicos denominados pinturas, según la forma de secado, según su función o según la naturaleza del ligando [5][55][56][61][49].

En la Figura 31 se muestra la clasificación siguiendo las distintas formas de secado.

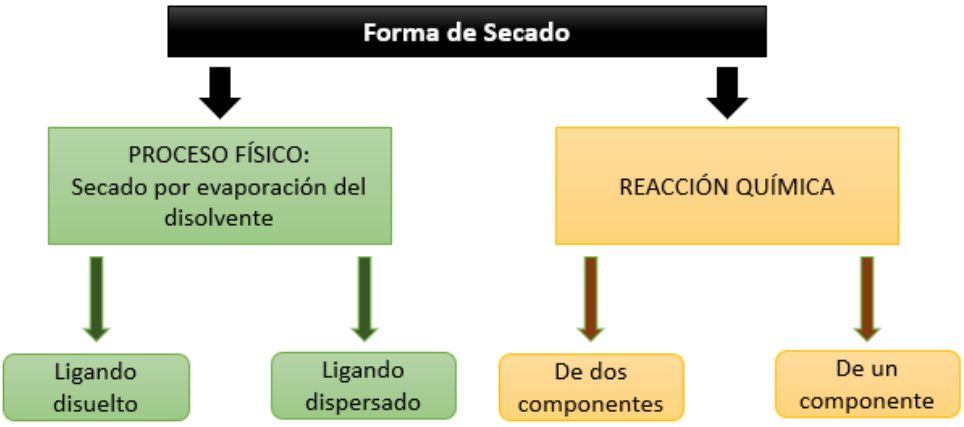


Figura 31. Clasificación de las pinturas en función de su forma de secado (Elaboración propia)

En la Figura 32 se presenta la clasificación de la pintura siguiendo su función: imprimaciones, pintura de fondos y pinturas de acabado.

Figura 32. Clasificación de las pinturas según su función (Elaboración propia)

En la Figura 33 se representa la tercera y última forma de clasificar las pinturas: según la naturaleza del ligando.

Figura 33. Clasificación de las pinturas en función de la naturaleza del ligando (Elaboración propia)

En la Tabla 10 se muestran, a modo de ejemplo, algunos de estos tipos de pinturas recogidos en la Figura 31, junto con su componente principal.

Tabla 10. Tipos de pinturas según la clasificación habitual (Elaboración propia)

TIPO DE PINTURA	COMPONENTE PRINCIPAL
Al aceite	Alquídicas
Acrílicas	Alquídicas/clorocaucho
Alquitrán	Epoxi
Brea	Poliuretano
Vinílicas	Silicatos inorgánicos
Nitrocelulosa	Resinas de silicona

Los sistemas de pintura están normalmente formados por varias capas, siendo el número y el espesor de éstas, variables en cada caso particular de sistemas material-medio de trabajo. Los espesores suelen estar ente 40 y 200 µm, pudiendo ser algo mayores en ciertas ocasiones. Existen estructuras en las que es estrictamente necesario la aplicación de pinturas anticorrosión son los cascos de los barcos, donde, aplicando pintura *antifouling* prevenimos la proliferación de microorganismos [64].

Las capas que componen estos sistemas se clasifican en los tres siguientes grupos [65]:

1. Capa de imprimación: es la capa en contacto con el metal o substrato, cuya misión se centra en proporcionar adhesión con el metal y con la capa intermedia o acabado. Contiene inhibidores de la corrosión y ha de ser resistente al ataque químico e impermeabilizante.

2. Capas intermedias: Son las capas presentes entre la imprimación y el acabado cuya misión es la de aumentar el espesor del recubrimiento. En ellas se ve incrementada la resistencia a la corrosión y la impermeabilidad. Con el desarrollo de nuevas formulaciones químicas en las pinturas, ha dejado de ser necesaria en algunos casos, lo que favorece a la reducción del coste del recubrimiento.

3. Capa de acabado: Es la capa superficial del recubrimiento, y está en contacto con el electrolito; su objetivo es proporcionar durabilidad, color, brillo y textura. Su espesor suele ser menor que el de las capas intermedias y las de acabado, debido a su mayor durabilidad.

En la Figura 34 se muestran estos tipos de capas de pintura que se aplicarían a un metal.

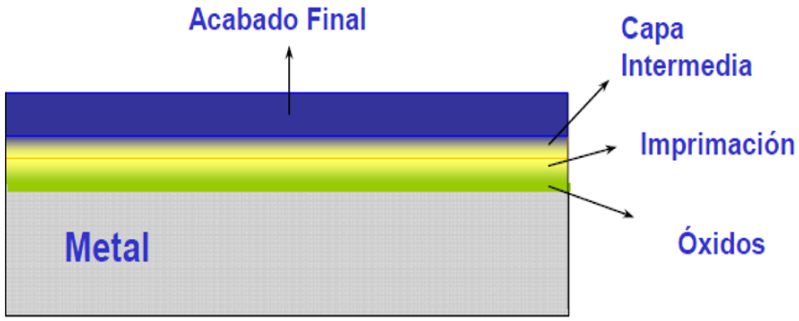


Figura 34. Capas de pintura a aplicar en los metales [66]

Las pinturas ejercen distintos tipos de protección sobre los metales [65]:

- Efecto barrera, la capa de pintura actúa como aislante, impidiendo la entrada del oxígeno, agua e iones a la superficie del metal, evitando así el proceso corrosivo.
- Inhibidores, actúan como tal las pinturas que contienen pigmentos, impidiendo o retardando el proceso de corrosión.

MÉTODOS DE APLICACIÓN DE LAS PINTURAS

Los métodos de aplicación más utilizados son los siguientes [60][67]:

1. Pistola sin aire: la pintura, previamente presurizada, se pulveriza debido a la rápida perdida de presión que sufre al ser proyectada mediante una boquilla de dimensiones pequeñas, sin ser previamente mezclada con aire. Este método proporciona espesores grandes, cuya eficiencia, que oscila entre 60-80%, se caracteriza por ser muy buena. La niebla producida durante la pulverización es mínima.
2. Pistola con aire: la pintura se mezcla con aire dentro de la boquilla y se proyecta debido al efecto Venturi. Se necesitan presiones menores que en el caso anterior y proporciona acabados de gran calidad. La eficiencia, 50-70%, de esta pistola es baja y produce bastante niebla de pulverización.
3. Pistola air-mix: es una mezcla de los dos métodos anteriores y su calidad de acabado se sitúa entre ambos, con eficiencia que oscila en estos valores, 55-75%.
4. Pistola electrostática: son equipos con efecto electrostático el cual se consigue cargando las pistolas eléctricamente mediante corriente continua a alta tensión, esto provoca la atracción de la pintura por parte de la superficie a pintar, estando

esta conectada a tierra. La eficiencia de este proceso ronda el 60-90% y su acabado suele ser bueno, apenas hay pérdidas de pintura en comparanza con los casos anteriores.

5. Brocha: la aplicación de pintura a brocha tiene muy baja eficiencia, con valores en torno al 5-15% debido a que requiere mucho tiempo, lo que hace al mismo tiempo elevar su coste. Tiene un acabado intermedio.
6. Rodillo: la aplicación de pintura con rodillo es un método intermedio entre la brocha y las aplicaciones con pistola. El rendimiento y la velocidad son mayores respeto a la brocha, sin embargo, tiene un peor acabado y su eficiencia no supera el 15%.

En la Figura 35 se presentan estos tipos de métodos para la aplicación de pintura.

Figura 35. Métodos de aplicación de pinturas (Elaboración propia)

Ciertos parámetros de las pinturas las caracterizan técnicamente y, entre ellos, caben destacar los siguientes [61]:

- El volumen de sólidos, VS, presente en 100 volúmenes de pintura, medido en condiciones de laboratorio. El VS se calcula como viene a continuación:

$$VS(\%) = \frac{Espesor\ película\ seca}{Espesor\ película\ húmeda} * 100 \quad (6)$$

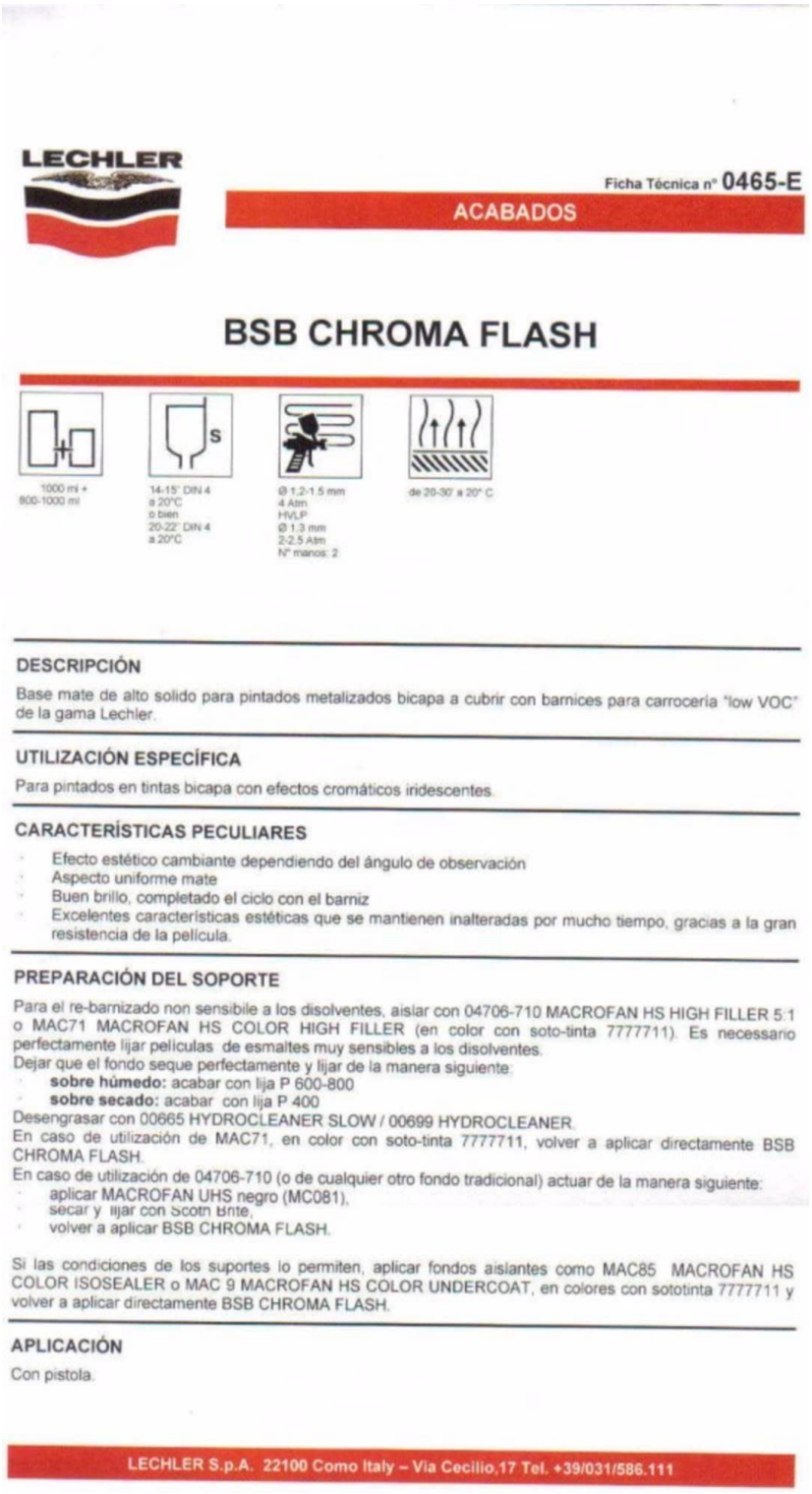
- El rendimiento teórico, sirve para determinar cuál es la superficie totalmente lisa que cubre un litro de pintura ante la inexistencia de pérdidas.

$$Rendimiento\ teórico(\%) = \frac{VS * 10}{Espesor\ película\ seca\ (\mu m)} \quad (7)$$

- La viscosidad, la cual se determina en el laboratorio, utilizando aparatos de medida conocidos como viscosímetros Krebs Stormer, cuyos datos se reflejan en unidades Krebs (K.U.)
- La finura de molienda, correspondiente con la granulometría de los pigmentos de la pintura.
- El peso específico.
- La adherencia, es decir, la tendencia que tiene el recubrimiento a aglutinarse a la superficie.
- La estabilidad, tendencia que tiene la pintura a mantener sus propiedades.
- Los tiempos de secado.
- La resistencia pertinente al impacto.
- El brillo.
- El color.

Estos no son los únicos parámetros que se utilizan a la hora de caracterizar las pinturas, y podrían mencionarse muchos más; ahora bien, todos ellos han de estar incluidos en las fichas técnicas de las pinturas.

En la Figura 36 se muestra, a modo de ejemplo, la ficha técnica de una pintura BSB Chroma Flash, donde se recogen las características peculiares, la preparación del soporte, el método de aplicación, etc. [68].



LECHLER

Ficha Técnica nº 0465-E

ACABADOS

BSB CHROMA FLASH

1000 ml + 800-1000 ml

14-15" DIN 4 a 20°C o bien 20-22" DIN 4 a 20°C

Ø 1,2-1.5 mm 4 Atm HVLP Ø 1.3 mm 2-2.5 Atm Nº manos: 2

de 20-30' a 20° C

DESCRIPCIÓN

Base mate de alto solido para pintados metalizados bicapa a cubrir con barnices para carrocería "low VOC" de la gama Lechler.

UTILIZACIÓN ESPECÍFICA

Para pintados en tintas bicapa con efectos cromáticos iridescentes.

CARACTERÍSTICAS PECULIARES

- Efecto estético cambiante dependiendo del ángulo de observación
- Aspecto uniforme mate
- Buen brillo, completado el ciclo con el barniz
- Excelentes características estéticas que se mantienen inalteradas por mucho tiempo, gracias a la gran resistencia de la película.

PREPARACIÓN DEL SOPORTE

Para el re-barnizado non sensibile a los disolventes, aislar con 04706-710 MACROFAN HS HIGH FILLER 5:1 o MAC71 MACROFAN HS COLOR HIGH FILLER (en color con soto-tinta 7777711). Es necessario perfectamente lijar películas de esmaltes muy sensibles a los disolventes.
Dejar que el fondo seque perfectamente y lijar de la manera siguiente:

- **sobre húmedo:** acabar con lija P 600-800
- **sobre secado:** acabar con lija P 400

Desengrasar con 00665 HYDROCLEANER SLOW / 00699 HYDROCLEANER.
En caso de utilización de MAC71, en color con soto-tinta 7777711, volver a aplicar directamente BSB CHROMA FLASH.
En caso de utilización de 04706-710 (o de cualquier otro fondo tradicional) actuar de la manera siguiente:

- aplicar MACROFAN UHS negro (MC081),
- secar y lijar con Scotch Brite,
- volver a aplicar BSB CHROMA FLASH.

Si las condiciones de los suportes lo permiten, aplicar fondos aislantes como MAC85 MACROFAN HS COLOR ISOSEALER o MAC 9 MACROFAN HS COLOR UNDERCOAT, en colores con sototinta 7777711 y volver a aplicar directamente BSB CHROMA FLASH.

APLICACIÓN

Con pistola.

LECHLER S.p.A. 22100 Como Italy – Via Cecilio,17 Tel. +39/031/586.111

Figura 36. Ficha técnica pintura [68]

En las normas UNE-EN ISO 4628 [69] [70] [71] [72] podemos encontrar los patrones fotográficos acerca de cómo realizar una inspección visual del estado de un recubrimiento,

método realmente importante con el paso del tiempo, pues la protección mediante pinturas dista de ser una solución infinita. A continuación, se mencionan los más utilizados:

- El grado de ampollamiento [70] de los recubrimientos de pintura se evalúa mediante la comparación de estos patrones; consiste en la valoración de las ampollas de un recubrimiento en función de su cantidad y tamaño. Si la superficie a examinar presenta distintos tamaños de ampollas, se definen según el tamaño considerado típico en el área de ensayo.

En la Figura 37 se muestran dos imágenes recogidas en la norma UNE-EN ISO 4628-2:2016 [70], la imagen de la izquierda concierne a la imagen óptica correspondiente a ampollas de cantidad 3-3(S4) y en la derecha su correspondiente para calibración.

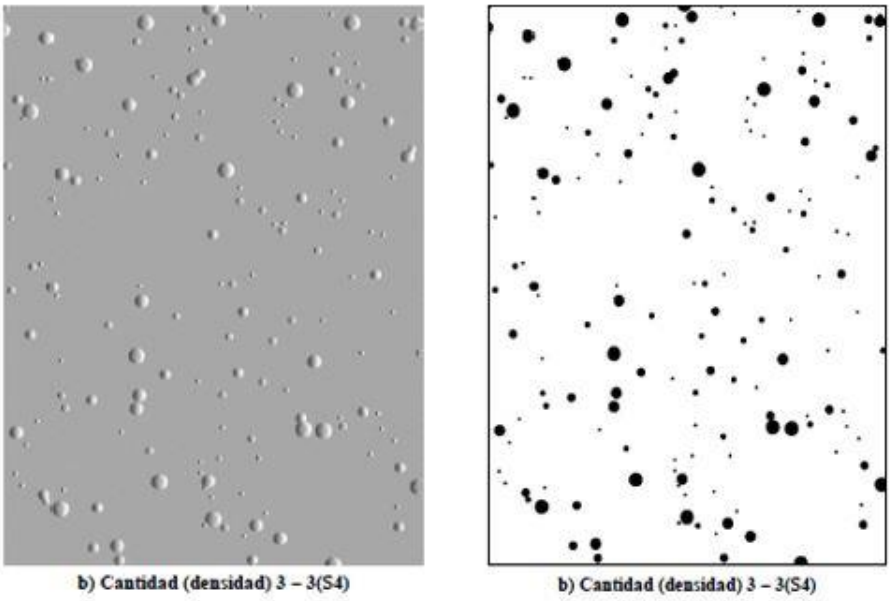


Figura 37. Muestra ampollamiento en superficie [70]

- El grado de oxidación [71] se valora en función del óxido suelto más el óxido subyacente visible; cuando son varios los grados de oxidación presentes en el área a evaluar, han de indicarse estos grados junto con una indicación del área en el que se producen.

En la Tabla 11 se recogen los grados de oxidación existentes en función de área oxidada destacados en la norma UNE-EN ISO 4628-3:2016 [36].

Tabla 11. Grados de oxidación según UNE-EN ISO 4628 (Elaboración propia)

Grado de oxidación	Área oxidada (%)
Ri 0	0
Ri 1	0,05
Ri 2	0,5
Ri 3	1
Ri 4	8
Ri 5	40 a 50

En la Figura 38 se muestra la comparación de la imagen del grado de oxidación más severo, el Ri5, con su imagen para calibración, recogidas en la norma mencionada anteriormente.

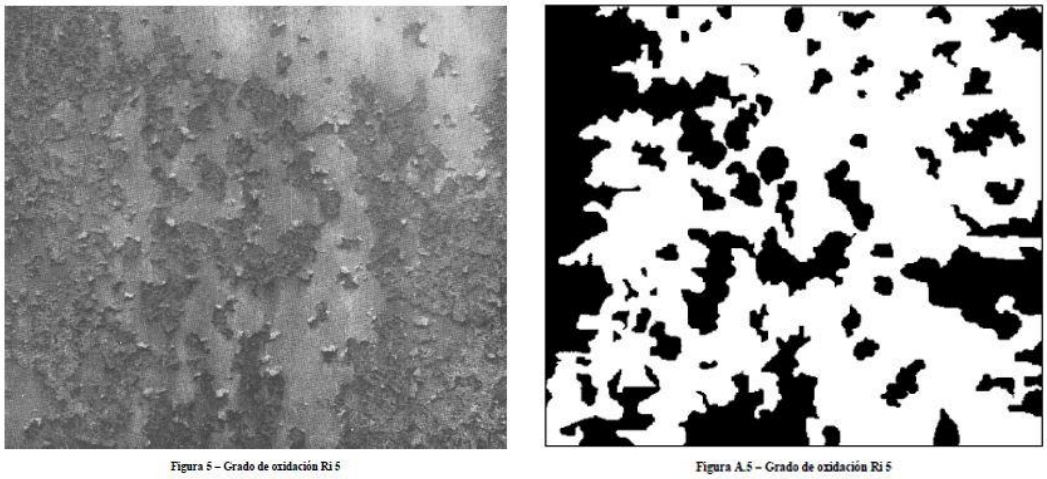


Figura 5 – Grado de oxidación Ri 5

Figura A.5 – Grado de oxidación Ri 5

Figura 38. Ejemplo grado de oxidación Ri5 [71]

- El grado de agrietamiento [72] se designa en función de la cantidad de grietas visibles en el área a estudiar, esto se recoge en la Tabla 12. Dichas grietas se describen en términos de cantidad, tamaño y profundidad.

Tabla 12. Cantidad y tamaño de las grietas, clasificación UNE-EN ISO 4628-4:2016 (Elaboración propia)

Grado	Cantidad de grietas
0	Ninguna, no se presencian grietas
1	Muy pocas, algunas grietas escasamente significativas
2	Pocas, pequeña cantidad pero significativa
3	Moderada cantidad de grietas
4	Considerable cantidad de grietas
5	Densa concentración de grietas

Grado	Tamaño de las grietas
0	No visibles con 10 aumentos
1	Visibles solo con aumentos de hasta x 10
2	Incipientemente visibles con una visión normal corregida (hasta 0,2 mm)
3	Claramente visibles con una visión normal corregida (mayores de 0,1 mm y hasta 0,5 mm)
4	Grandes grietas, mayores de 0,5 mm y hasta 1 mm de anchura
5	Grietas muy grandes, generalmente de mas de 1 mm

En la Figura 39 se muestra un agrietamiento de densidad 5, cuya concentración de grietas es considerable; en este caso, sin una dirección preferente.

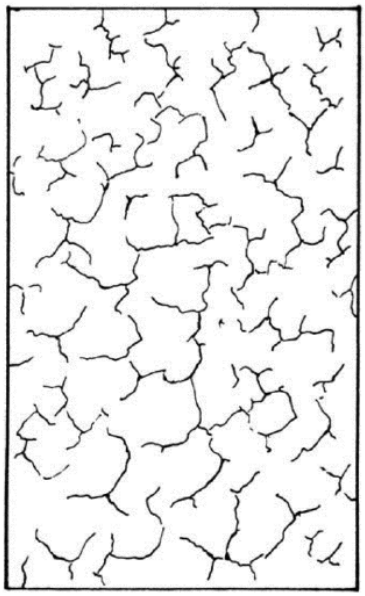


Figura 39. Agrietamiento Cantidad (densidad 5) [72]

- El grado de descamación [69] describe el desprendimiento de escamas en el área de recubrimiento, en función de la cantidad, el tamaño y la profundidad. Se evalúa siguiendo la Tabla 13 en cuanto a área de descamación y tamaño del mismo.

Tabla 13. Clasificación del grado de descamación (Elaboración propia)

Grado	Área de descamación (%)
0	0
1	0,1
2	0,3
3	1
4	3
5	15

Grado	Tamaño de descamación
0	No visibles con 10 aumentos
1	Hasta 1 mm
2	Hasta 3 mm
3	Hasta 10 mm
4	Hasta 30 mm
5	Por encima de 30 mm

En la Figura 40 se muestra un ejemplo de grado 5 de descamación sin dirección preferente, recogido en la norma UNE-EN ISO 4628-5:2016.

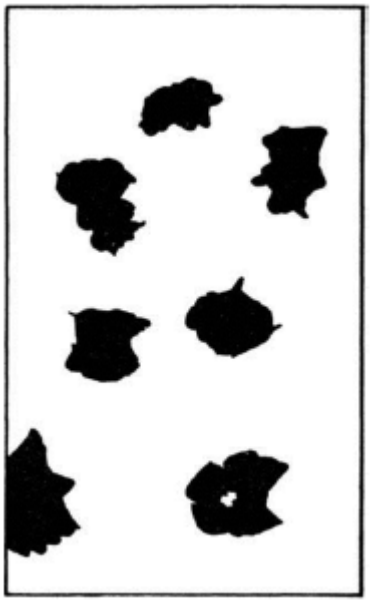


Figura 40. Descamación sin dirección preferente cantidad (densidad) 5 [69]

Una vez conocido el recubrimiento orgánico como medida anticorrosiva, utilizado en la barandilla objeto del presente Proyecto Fin de Máster, es decir, la pintura, se procede a recoger la influencia que tienen los agentes externos sobre el fenómeno de la corrosión.

2.5.- Influencia de los agentes externos

Tras conocer los distintos tipos de corrosión, es importante estudiar la influencia que tienen los agentes externos sobre este fenómeno. Los factores que afectan a la corrosión, entre otros, son, la humedad, la temperatura, la salinidad, el contenido de azufre y la diferencia entre la fecha de fabricación y la de puesta en servicio, pues algunos componentes se acumulan durante más de 20 años en almacenes, sin cumplir su función. Estos agentes externos pueden tener influencia, tanto en el inicio de las grietas como en su propagación posterior. Cabe destacar que sus valores pueden cambiar a lo largo del tiempo, atendiendo a cinéticas de diferentes tipos [73].

Los tres factores a los que se ha de dar gran importancia en el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster son los siguientes:

- La climatología, son las distintas características que presenta un lugar en cuanto a mayor o menor temperatura, humedad, presión, precipitaciones, vientos, etc. Es un factor muy importante a la hora de realizar estudios de corrosión en elementos estructurales particularmente ubicados en el exterior. La corrosión se lleva a cabo en metales expuestos a niveles distintos de lluvia, incidencia solar o viento y, en función de la exposición a estos agentes, los grados de corrosión son distintos.

  Los niveles de humedad altos, como son los existentes en la ciudad de Santander, y más aún en la Bahía, producen un aumento de la velocidad de corrosión, debido al depósito sobre la superficie metálica de una fina capa de agua, que actúa como electrolito favoreciendo la aparición de corrosión.

  Otro factor esencial a estudiar, cuando hablamos de corrosión, es el viento. El viento incide directamente sobre las superficies de los materiales, desgastando sus posibles capas protectoras. Además~~, este agente corrosivo,~~ arrastra partículas de polvo y otros elementos, como puede ser la arena de la playa, que favorecen el deterioro y la erosión de las superficies metálicas.

En la Tabla 14 se muestran, y a modo de ejemplo, los datos climatológicos de cuatro días aleatorios, a lo largo de los últimos 10 años en la ciudad de Santander, uno de cada estación del año.

Tabla 14. Parámetros anuales climatológicos Bahía de Santander (Elaboración propia)

DÍA	TEMPERATURA	VIENTO	HUMEDAD
10 Enero	8-12ºC	20,5 km/h	82%
20 Abril	10-15ºC	17,6 km/h	90%
24 Julio	17-22ºC	14 km/h	92%
12 Octubre	14-19ºC	17,2 km/h	80%

La proximidad al mar, es un factor indispensable para la selección previa de las tres zonas críticas estudiados en el presente PFM. Se conoce como efecto de la distancia a la costa, al que ejercen las partículas salinas acelerando el proceso de corrosión metálica en la superficie de los metales. En función de un estudio realizado por la Unión Europea [47] , en el que se recoge el decrecimiento de la salinidad con la distancia a la costa en 29 lugares costeros de Europa, se concluye que:

- La salinidad atmosférica es el factor que controla la corrosión en las atmósferas marinas puras, como es la presente en El Sardinero, Santander.
- La salinidad atmosférica y la corrosión metálica se relacionan linealmente para un intervalo de depósito de ion cloruro entre 4-500 mg Cl^-/m^2día.
- La relación ente corrosión-salinidad/distancia a la costa sigue un trazado hiperbólico, en el que, tras decrecer de forma exponencial, a medida que aumenta alcanza un valor asintótico, que podría corresponderse con el valor de la corrosión atmosférica de la región.

En la Figura 41 se muestra un trozo de barandilla de la Segunda Playa del Sardinero en la que se aprecia el depósito de las partículas de sal sobre la superficie, tras evaporación del agua de mar, intensificando el proceso de corrosión.

Figura 41. Barandilla afectada por la salinidad del agua del mar (Elaboración propia)

La selección del material adecuado, capaz de resistir a la corrosión en ambientes marinos es muy importante. Es por ello la búsqueda meticulosa de sistemas especialmente resistente a este medio como son las aleaciones de aluminio de la serie 6000 junto con aceros inoxidables superdúplex y aleaciones base cobre, como bronce navales o de almirantazgo así como bronces de elevada aleación NAB y MAB [39][40][47][74].

Todos estos factores son igual de importantes en las tres zonas definidas como críticas para el desarrollo del presente trabajo, aunque no actúen de la misma forma. Como bien se ha mencionado al comienzo, la distancia a la costa varía en todas ellas, al igual que la incidencia de los vientos.

En la Figura 42 se presenta un mapa con las líneas de isocorrosión ($\mu m\ a^{-1}$) del acero en España, en él se puede ver como los valores más altos pertenecen a las zonas norte, noroeste y sur próximas a la costa [43]. Los diagramas o mapas de isocorrosión permiten trazar curvas para indicar las tasas o niveles de corrosión en un punto determinado. Santander es una de las ciudades situadas más al norte de la península ibérica, consideradas estas zonas como aquéllas en las que la corrosión está más presente, a diferencia de las zonas rurales.

Figura 42. Mapa isocorrosión España [75]

Una vez introducido teóricamente el fenómeno de la corrosión, pasaremos a describir la lógica difusa, método que se emplea en el desarrollo del presente Proyecto Fin de Máster para evaluar la corrosión a lo largo de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, Santander, España.

2.6.- Lógica difusa

La lógica difusa o lógica *fuzzy* es una metodología que proporciona una manera sencilla y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada ambigua, vaga, incompleta e imprecisa. Esta lógica facilita un mecanismo de inferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano mediante sistemas basados en el conocimiento. En el marco matemático, la lógica *fuzzy*, permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que puedan tratarse a través de un ordenador [76].

Es, básicamente, una lógica *multivaluada* que permite representar de forma matemática la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento. Se emplean valores intermedios para poder definir evaluaciones: si/no, mucho/poco, negro/blanco, etc. Es muy recomendable el uso de variables lingüísticas como: muy alto, alto, muy bajo y bajo, ya que las decisiones suelen ser descritas y evaluadas con

términos imprecisos. Cualquier problema puede ser resuelto como un conjunto de variables de entrada, a partir del cual, se obtiene un conjunto de variables de salida. Esta lógica permite establecer un mapeo de una forma adecuada, teniendo en cuenta los criterios de significado, y no de precisión [7][8][77].

El concepto *Lógica Difusa* se utilizó por primera vez en 1974, por el ingeniero Lotfy A. Zadeh en la Universidad de Berkeley (California). En su propuesta presentó la lógica difusa como una forma de procesamiento de información cuyos datos podrían tener asociados un grado de pertenencia parcial a distintos conjuntos. A mediados de los 70, cuando los ordenadores comenzaron a tener suficiente potencia como para permitir su ejecución, este método se aplicó a los sistemas de control [76].

En la Figura 43 se muestra al inventor de la Lógica Difusa, el ingeniero Zadeh (Berkeley, EEUU, 1921-2017) quien afirmaba que "La lógica difusa trata de copiar la forma en la que los humanos toman decisiones. Lo curioso es que, aunque baraja información muy precisa: se puede aparar un coche en muy poco espacio sin darle al de atrás. Suena a paradoja, pero es así".

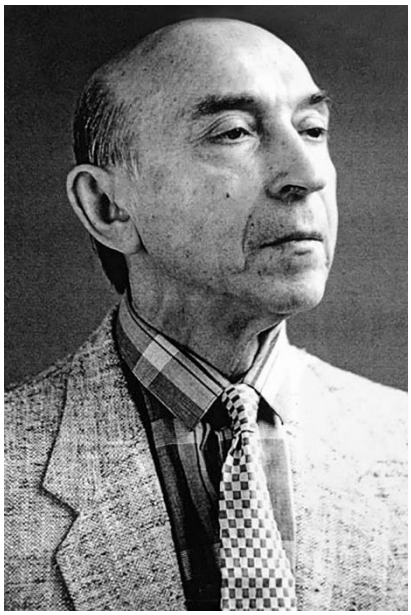


Figura 43. Lofty A. Zadeh, Lógica Difusa [78]

El estudio de la lógica difusa por parte de Zadeh se recoge en tres etapas distintas [76]:

- La primera etapa, entre 1965 y 1974, es cuando describe el concepto general de conjunto difuso y su pertenencia relacionada con la toma de

valores en el intervalo unitario. En esta etapa los mecanismos de razonamiento no se describen en profundidad.

- La segunda etapa, desde 1972 hasta el 2000; en ella se introducen dos conceptos muy importantes como son la variable lingüística y las reglas *if-then*. Gracias a estos conceptos y su desarrollo, evolucionaron rápidamente las aplicaciones de control difuso, sobre todo en Japón.
- La tercera etapa, a partir de 1996, se centra en la computación con palabras mediante el procesamiento del lenguaje natural para la búsqueda en internet y el desarrollo de respuesta automáticos.

Actualmente, existen una gran variedad de líneas de investigación que emplean la lógica difusa en diversidad de áreas de aplicación. Una de estas áreas es la medicina, concretamente la aplicación del método *fuzzy* para estudiar la Covid19 [79][80]. Además, este tipo de lógica es también muy empleada en neurología, para lidiar con sufrimientos como la epilepsia o las enfermedades mentales [81][82][83].

Cabe destacar la diferencia entre *Lógica Difusa* y *Probabilidad*. La probabilidad representa información sobre la frecuencia de ocurrencias relativas de un evento sobre el total de eventos posibles, mientras que el principio de difusividad representa las similitudes de un evento respecto a otro, donde las propiedades de los mismos no están definidas de manera precisa.

Como se ha visto, la lógica difusa permite a un ordenador razonar como si de una persona se tratara, definiendo distintos grados de pertenencia o de verdad. Para estudiar esta metodología son imprescindibles dos términos, los conjuntos difusos y las variables lingüísticas. Los primeros se recogen en el siguiente apartado.

2.6.1.- Conjuntos difusos

Zadeh estaba disconforme con los conceptos clásicos, debido a la focalización de estos en dos opciones, la pertenencia o no de un elemento a dicho conjunto. Es por esto por lo que presentó esta forma de procesar información: permitiendo pertenencias parciales a diversos conjuntos, ~~son los~~ denominados Conjuntos Difusos (*fuzzy sets*). Conocida la Lógica Difusa como teoría de conjuntos, en las que un elemento puede o no pertenecer a un conjunto donde la frontera no está precisamente definida, y cuyo grado de pertenencia se representa por un valor entre 0 y 1, lo que hace que una proposición no es totalmente cierta o falsa [77].

El ejemplo más común para representar la idea de conjunto difuso es la representación de la altura de un conjunto de hombres, descrito a continuación [77] [84]:

- Hombres altos: todos aquellos que alcanzan la altura de 1,80 metros. Es decir, si estuviéramos estudiando la lógica clásica, quedaría fuera del conjunto aquel hombre cuya estatura sea 1.79 metros, mientras que un individuo de 1,81 metros si sería alto. Esto no parece muy lógico, pues sus alturas difieren en tan solo dos centímetros. Es por esto por lo que la lógica difusa mantiene que el conjunto *hombres altos* no tiene frontera clara para formar o no parte de él. Mediante una función se define la transición alto a no alto, de manera que un hombre que mide 1,78 metros puede pertenecer al conjunto difuso mencionado con un grado de pertenencia de 0.8, uno de 1,81 con un 0.85 y uno de 1,50 con un grado de 0.1.

En la Figura 44 se recoge el ejemplo mencionado con anterioridad, la Figura 42(a) recoge el conjunto de alto de la probabilidad, en este caso, para todos los hombres cuya altura supera los 1,75 metros, por otro lado, la Figura 42(b) es un ejemplo del conjunto *fuzzy alto,* a cada nivel le corresponden distintas medidas de la altura, con diferentes grados de pertenencia a dicho conjunto y donde los límites no están definidos de forma clara, son limites *borrosos* o *difusos*, es decir, límites *fuzzy* [9].

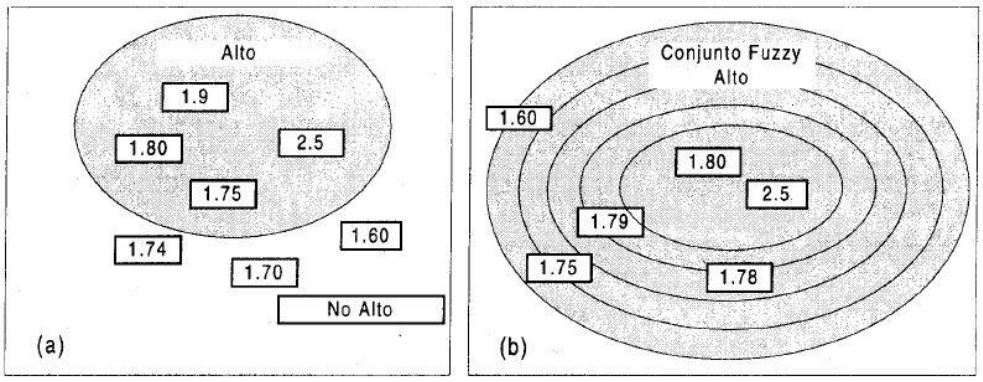


Figura 44. Conjunto tradicional (a), Conjunto *Fuzzy* (b) [9]

En la Figura 45 se recogen gráficamente los funcionamientos de la lógica difusa y la lógica clásica. A la izquierda se muestra la gradualidad del proceso difuso, opuesta totalmente a la drasticidad del método clásico.

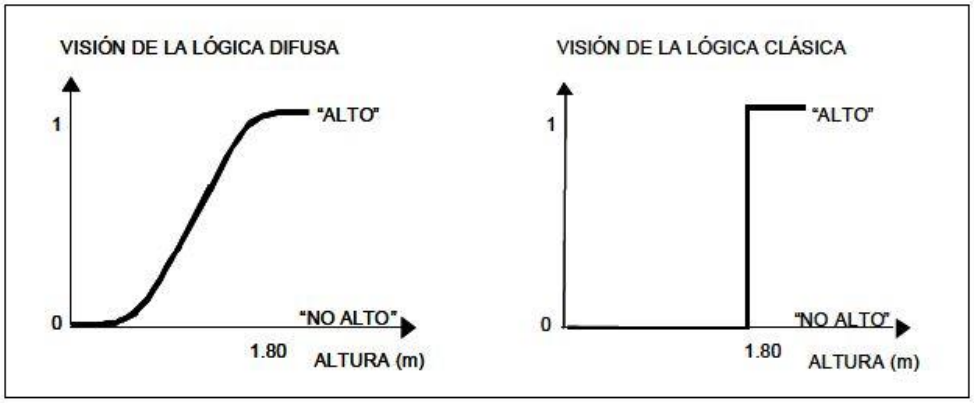


Figura 45. Lógica Difusa versus Lógica Clásica [84]

El grado de pertenencia de cada elemento a un conjunto se define mediante *la función característica* $\mu_A(x)$, asociada al conjunto difuso: para cada valor posible de una variable de entrada x, dicha función proporciona el grado de pertenencia de este valor de x al conjunto difuso correspondiente. A continuación se describen las formas de definir un conjunto clásico en un universo de discurso [28]:

- Conjunto A
- Universo de discurso X
  - Enumerando los elementos pertenecientes al conjunto:
    A={1,3,10,27}
  - Especificando cuales son las propiedades que han de cumplir los elementos pertenecientes a dicho conjunto.
  - Refiriéndose a la función de pertenencia $\mu_A(x)$:

$$\mu A(x) = \begin{cases} 1 \text{ si } x \in A \\ 0 \; si \; x \notin A \end{cases} \quad (8)$$

    En este caso, conocer la función de pertenencia implica conocer A.

Un conjunto difuso de un universo de discurso se caracteriza por una función de pertenencia que toma valores dentro del intervalo [0,1], y que puede representarse como un conjunto de pares ordenados de un elemento x, cuyo valor de pertenencia es:

$$A \equiv \{x, \mu A, x \in A\} \quad (9)$$

El grado de similitud de un elemento de C con el conjunto difuso se mide mediante la función característica, dependiendo la forma utilizada de la función del criterio aplicado a la hora de resolver cada problema y variará en función de la cultura, geografía, época o

punto de vista del usuario. La única obligación que tiene que cumplir la función característica es que tome valores con continuidad comprendidos entre 0 y 1 [84].

En la Figura 46 se recogen algunas de las funciones características más utilizadas, debido fundamentalmente, a su simplicidad matemática y su manejabilidad. Estas son: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoidal, gamma, pi, campana, etc.

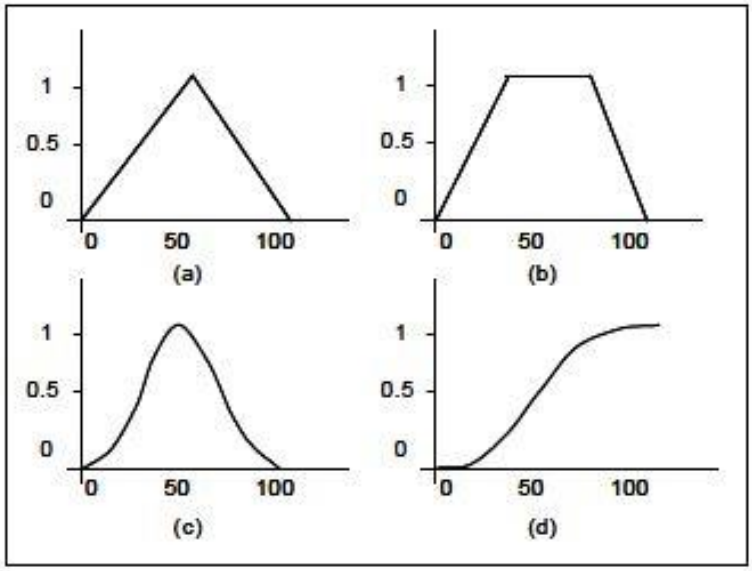


Figura 46. Funciones características habituales en lógica difusa, triangular (a), trapezoidal (b), gaussiana (c) y sigmoidal (d) [84]

Es el analista experto o usuario el que elige el número de funciones características asociadas a una misma variable ya que, cuantas más funciones, mayor resolución y, a su vez, mayor complejidad computacional. Estas variables pueden o no estar solapadas, y, en caso de estarlo, se presenta un aspecto clave dentro de la lógica difusa; una variable puede pertenecer con distintos grados a varios conjuntos difusos a la vez, es decir, "el vaso puede estar medio lleno al mismo tiempo que está medio vacío"[84].

2.6.2.- Operaciones con conjuntos difusos

Las operaciones básicas utilizadas entre los conjuntos difusos son las que se recogen a continuación:

- El conjunto complementario $\bar{A}$ de un conjunto difuso A es aquel cuya función característica se define como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \qquad (10)$$

- La unión de dos conjuntos difusos, sean estos A y B, es un conjunto difuso A ∪ B cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{A \cup B} = máx[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (11)$$

- La intersección de dos conjuntos difusos A y B, es el conjunto difuso A ∩ B con función característica:

$$\mu_{A \cap B} = min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (12)$$

Estas operaciones cumplen, al igual que la teoría clásica de conjuntos, tres propiedades: asociativa, conmutativa y distributiva, así como las Leyes de Morgan.

Dos leyes donde no se cumple lo mencionado anteriormente son el Principio de contradicción: A ∪ Ā = U, y el Principio de exclusión: A ∩ Ā = ϕ. Estas dos leyes no se cumplen en términos de *fuzzy logic*.

2.6.3.- Propiedades

Los conjuntos difusos tienen las siguientes propiedades [76]:

- Conmutativa: A ∩ B = B ∩ A
- Asociativa: A ∪ (B ∪ C) = (A ∪ B) ∪ C
- Distributiva: A ∪ (B ∩ C) = (A ∪ B) ∩ (A ∪ C)
- Idempotencia: A ∪ A = A y A ∩ A = A
- Involución: ¬(¬A) = A
- Transitiva: Si (A ⊂ B) ∩ (B ⊂ C) entonces A ⊂ C[1]
- Leyes de Morgan: ¬(A ∩ B) = ¬A ∪ ¬B y ¬(A ∪ B) = ¬A ∩ ¬B

Con estas operaciones, propiedades y modificadores podemos obtener gran variedad de expresiones.

2.6.4- Etapas del Método *Fuzzy* (Lógica Difusa)

Son tres las etapas de las que consta este método, las cuales deben desarrollarse estrictamente, y siempre en el mismo orden.

En la Figura 47 se muestra un esquema en donde se recogen dichas etapas, con el orden correspondiente. Una vez definidas las variables de entrada, puede comenzar la *Fuzzyficación* y, tras las tres etapas: *Fuzzyficación*, Motor de interferencia y *Defuzzyficación*, obtenemos las variables de salida.

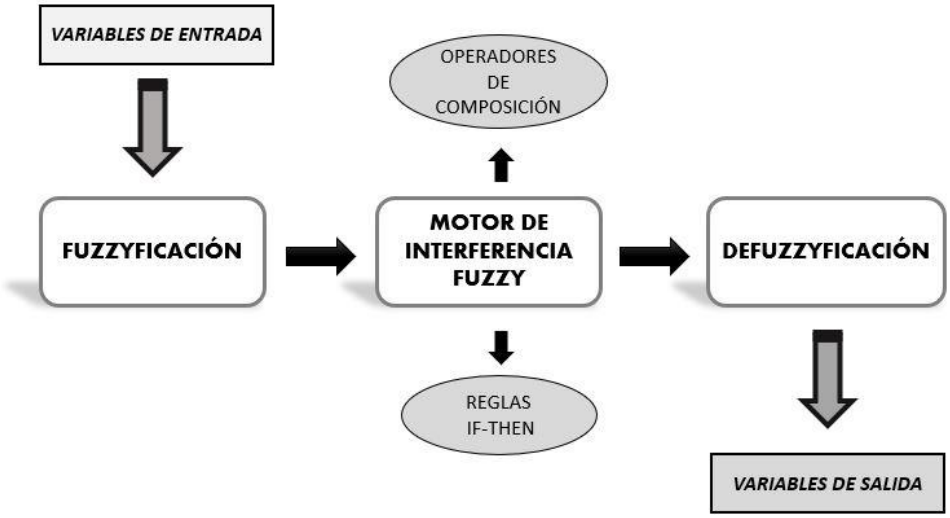


Figura 47. Etapas Método *Fuzzy* (Elaboración propia)

Para aclarar y entender un sistema *fuzzy* han de tenerse en cuenta los siguientes términos [9]:

Etiqueta: Nombre descriptivo empleado para identificar una Función de Pertenencia, como pueden ser Bajo, Mediano, Alto, Muy Alto.

Función de pertenencia: Define a un conjunto *fuzzy* mapeando entradas abruptas de su dominio hasta su Grado de Pertenencia.

Entradas Abruptas: Son diferentes valores discretos de la variable del sistema, por ejemplo, las alturas: 1.60, 1.75, 1.80.

Rango o Dominio: Intervalo sobre el cual una función de pertenencia es definida.

Universo de Discurso: Rango de todos los valores posibles que puede tener la variable del sistema.

Una vez comprendidos estos términos, se puede empezar a trabajar con los distintos pasos del método, descritos todos ellos a continuación [7] [8] [9] [77] [76] [78] [84] [28] :

1. Fuzzyficación

Es la primera etapa de operación de un sistema difuso y trata la conversión de los datos o variables de entrada al conjunto difuso. Se calcula el grado de pertenencia que puede tener cada entrada abrupta a una o varias funciones de pertenencia de una variable.

No todos los datos recogidos para un estudio de probabilidad son utilizados en el método *fuzzy*. Para transformar las entradas abruptas, es decir, dichos datos, en entradas fuzzy, primero han de determinarse las funciones de pertenencia de la variable. Una vez realizado esto, se procede a comparar dicha entrada abrupta con la función de pertenencia correspondiente, dando lugar así a los valores de entrada *Fuzzy*.

En la Figura 48 se muestra el procedimiento a seguir para calcular el grado de pertenencia de cada entrada abrupta.

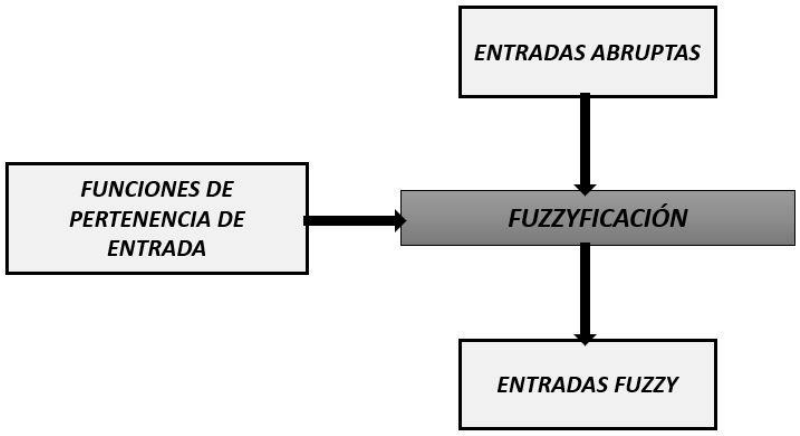


Figura 48. *Fuzzyficación* (Elaboración propia)

Volviendo al ejemplo de la altura de los individuos, para la variable de entrada se pueden escoger distintas etiquetas, como podrían ser: Bajo, Mediano, Alto.

En la Figura 49 se recoge, a modo de ejemplo y en relación con el estudio de la altura de un conjunto de hombres, el gráfico que representa el grado de pertenencia para el cual los valores de entrada abrupta pertenecen a cada función de pertenencia de dicho caso. En el eje Y encontramos el grado de pertenencia, mientras que en el eje X se presenta la altura, en cm.

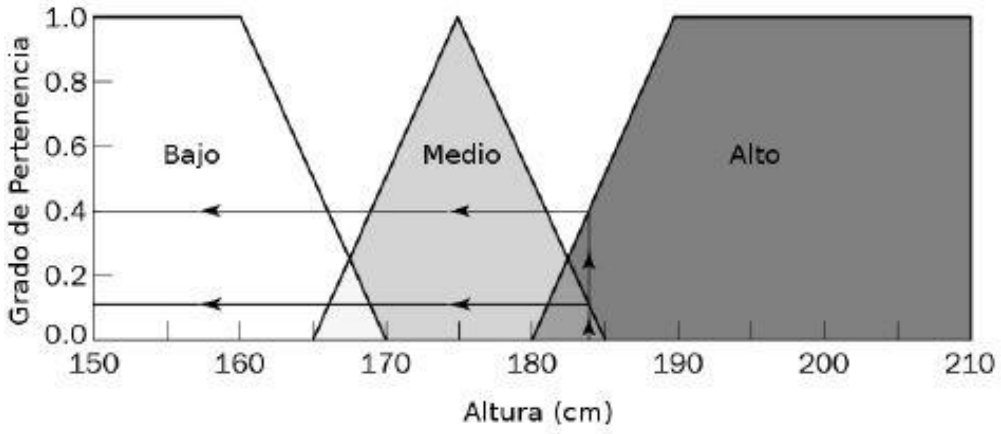


Figura 49. Descripción Conjunto "persona alta" *Fuzzy* [76]

2. Motor de interferencia

Es la segunda etapa de la lógica *fuzzy*, también se conoce como Regla de Evaluación o Interferencia *fuzzy*, el controlador *fuzzy* usa reglas lingüísticas sobre los resultados generados a partir de la primera etapa.

En la Figura 450 se representa el esquema característico de este procedimiento.

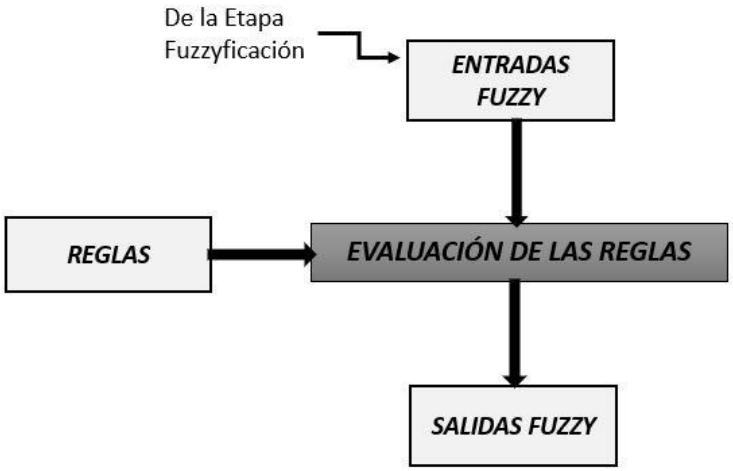


Figura 50. Motor de interferencia (Elaboración propia)

Las reglas *fuzzy* son sentencias Si-Entonces (IF-THEN), describen cual es la acción a ser tomada como respuesta a varias entradas *fuzzy*. A continuación, se recogen una serie de términos lingüísticos que han de tenerse en cuenta para determinar estas reglas:

IF (antecedente 1) AND (antecedente 2) THEN (consecuencia 1) AND (consecuencia 2), siendo AND uno de los operadores de la lógica *fuzzy*.

Los antecedentes han de tener el siguiente formato:

Variable de entrada = Etiqueta (La altura (etiqueta) es alta (etiqueta))

Por otra parte, el consecuente está en la forma de:

Variable de salida = Etiqueta

Las reglas se rigen según el comportamiento del sistema, y se escriben en términos de las etiquetas de las funciones de pertenencia. Los antecedentes de dichas reglas tienen un grado de pertenencia o relevancia, calculado previamente durante la *Fuzzyficación*. Como los antecedentes son conectados por el operador AND, la regla de fuerza toma como resultado el valor más pequeño de los mismos.

Una vez se han evaluado las reglas, se ha de determinar la salida *Fuzzy*, comparando las distintas fuerzas de todas ellas que especifican la misma acción de salida.

3. Defuzzyficación

Es la tercera etapa del proceso, cuyo objetivo final se centra en encontrar las salidas abruptas, para lo cual cada salida *fuzzy* modificará a su respectiva función de pertenencia de salida.

En la Figura 51 se esquematiza el proceso interno de esta última etapa.

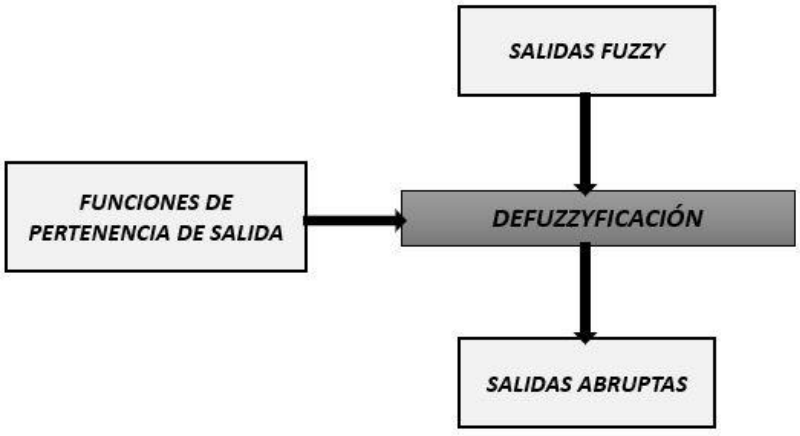


Figura 51. *Defuzzyficación*

La *Defuzzyficación* cuenta con distintos métodos para su desarrollo, siendo los más comunes los detallados a continuación:

- Método de la Media Ponderada.

  Trata de calcular el promedio de los valores de salida que se hubieren obtenido para cada uno de los conjuntos *fuzzy* multiplicados o ponderados por el peso de la regla correspondiente o grado de pertenencia al subconjunto.

- Método de Centro de Masa (Centro de Gravedad o Centroide).

  Se determina el centro de gravedad del conjunto de salida, a partir de la unión de las contribuciones de todas las reglas válidas. La abscisa del punto central de gravedad es el valor de salida.

- Método Singleton.

  Dicho método deriva del anterior y en él se obtienen las abscisas de los puntos del centro de gravedad para cada regla válida. El valor de salida se obtiene a partir de la media ponderada con relación a los distintos grados de pertenencia de estos valores.

Basándose en todo el contenido teórico recogido a lo largo de este capítulo, Estado del Arte, cabe destacar la elección del Método *Fuzzy* de Lógica Difusa debido a la gran influencia que tienen sobre el fenómeno de la corrosión numerosas y diversas variables que, a su vez, cambian sus valores con el tiempo. El objetivo principal, centrado en el estudio de la corrosión de la barandilla de la Playa de El Sardinero II, tendrá como herramienta un análisis digital de imágenes previo al desarrollo del Método *Fuzzy*, tras el cual se obtendrán todas las variables abruptas a introducir.

3. MÉTODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1.- Planteamiento y Localización

En este capítulo se desarrolla la Metodología de Trabajo seguida y empleada durante el desarrollo del presente Proyecto Fin de Máster. Se detallan las principales etapas llevadas a cabo para su realización, desde la Recogida de Datos hasta la Aplicación del Método *Fuzzy*, pasando por el Cálculo de Variables a partir del Procesamiento de imágenes. El correcto desarrollo de estas etapas es esencial para lograr el objetivo final: la evaluación de los distintos grados de corrosión a lo largo de la barandilla de La Segunda Playa del Sardinero, Santander, España.

- La Selección de las Zonas Críticas, es la primera fase por desarrollar, e implica la definición de las distintas zonas críticas afectadas por la corrosión a lo largo de la Segunda Playa del Sardinero, en Santander, la elección de las zonas más perjudicadas en los distintos tramos de barandilla.
- La Adquisición de Fotografías, consiste en realizar un barrido de cada zona crítica, tomando fotografías en cantidades elevadas, posteriormente serán seleccionadas las más adecuadas en cuanto a claridad, nitidez, calidad, etc. para así obtener los datos más representativos.
- Procesado de imágenes, esta tercera etapa permite mejorar la información que contiene cada una de las fotografías seleccionadas, con el fin de obtener dimensiones semejantes que permitan analizar las zonas más interesantes de cada una de ellas, extraer información una por una y almacenar los datos. Los pasos a seguir en el Procesado de las imágenes son: segmentación, conversión a imagen binaria, cálculo del área segmentada y por último recogida de resultados. El software utilizado tanto para esta etapa como para las dos siguientes es MATLAB.
- El Cálculo de Variables, nos permite obtener las distintas áreas de trabajo necesarias, mediante los denominados grados de corrosión. A partir de los grados

de corrosión se realizarán los cálculos correspondientes para obtener las áreas, que serán las variables de entrada de la siguiente etapa, la Lógica *Fuzzy*.

  - Grado 0 → Área libre de corrosión
  - Grado 1 → Área de corrosión incipiente
  - Grado 2 → Área ocupada por grietas y picaduras
  - Grado 3 → Área mayormente afectada por la corrosión
  - Grado 4 → Área totalmente corroída

- La Aplicación del Método *Fuzzy*, es la quinta etapa, la cual nos llevará a la obtención del grado de corrosión en cada una de las zonas previamente elegidas, para así, poder definir las zonas más afectadas. El software MATLAB nos proporciona una interfaz específica, denominada *Fuzzy Logic Toolbox*^{TM} que, mediante la introducción de unas variables de entrada, nos ayuda a obtener todos los datos necesarios para definir las variables de salida o Grados de Corrosión.
- El Análisis de Corrosión en cada zona, consiste en comparar los resultados obtenidos para cada una de ellas y relacionarlos con las ideas extraídas del análisis visual realizado al inicio del presente Proyecto.
- Por último, una vez analizados todos los resultados obtenidos, se desarrollan unas ideas o líneas de trabajo futuro, que comprenderán un plan de mantenimiento, el desarrollo o planteamiento de un proyecto de sustitución de la barandilla y también la comparación de los datos y conocimientos alcanzados con la corrosión en otras zonas costeras similares.

En la Figura 52 se presenta un diagrama de flujo que recoge la metodología a seguir durante el desarrollo del trabajo.

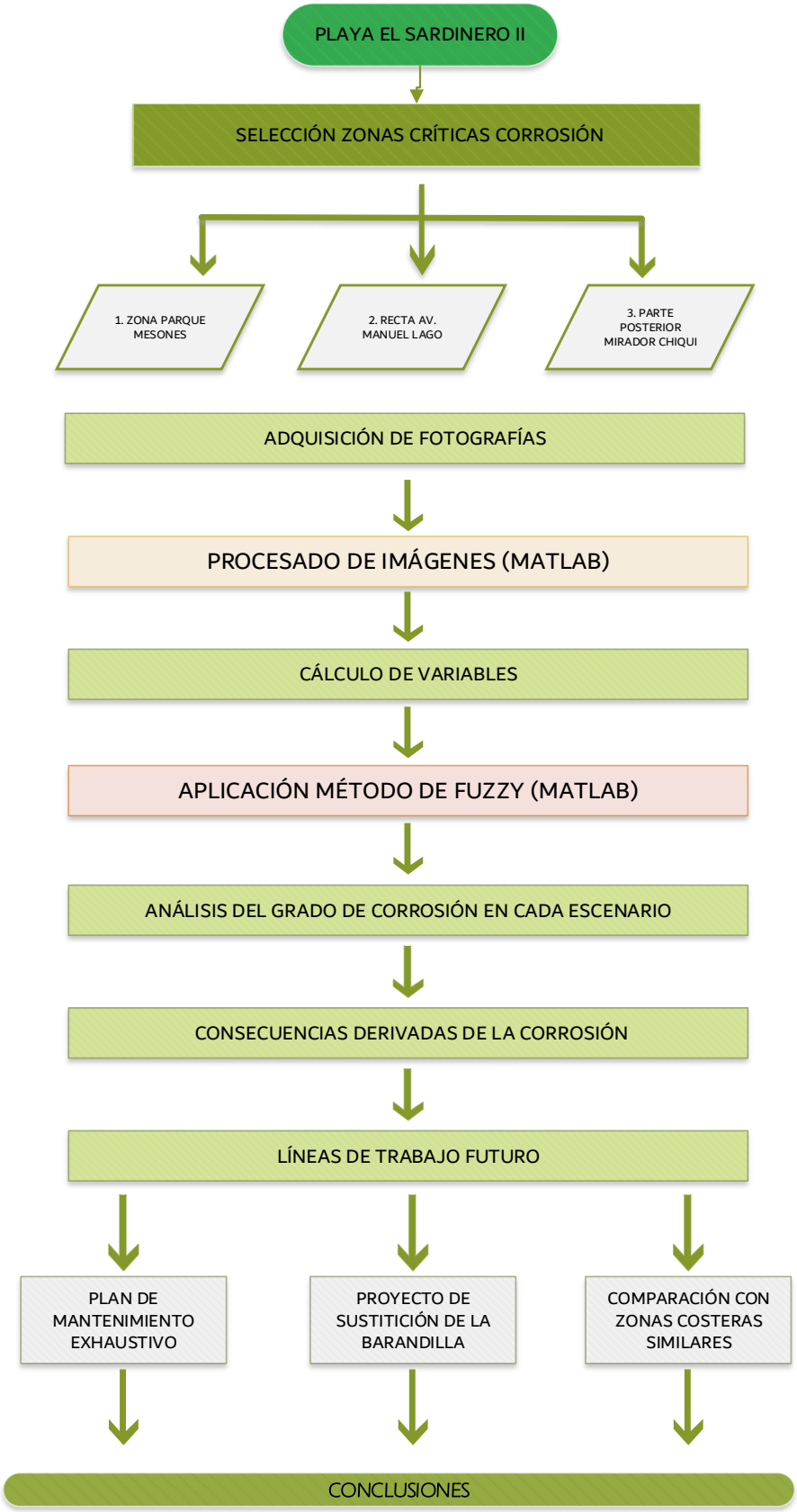


Figura 52. Flujograma que recoge el desarrollo completo del Proyecto (Elaboración propia)

La barandilla objeto de estudio, como se ha mencionado en el Capítulo 1, se encuentra ubicada en Santander, capital de la Comunidad Autónoma de Cantabria, y es la correspondiente a La Segunda Playa del Sardinero, desde los Jardines de Piquío hasta la Ensenada del Sardinero.

En las Figuras 53,54 y 55 se sitúa dicha barandilla, para una mejor comprensión de su ubicación concreta, tomando como referencia el mapa de España y localizando la ciudad de Santander totalmente al norte del país.

Figura 53. Localización España [85]

Figura 54. Localización Cantabria [85]

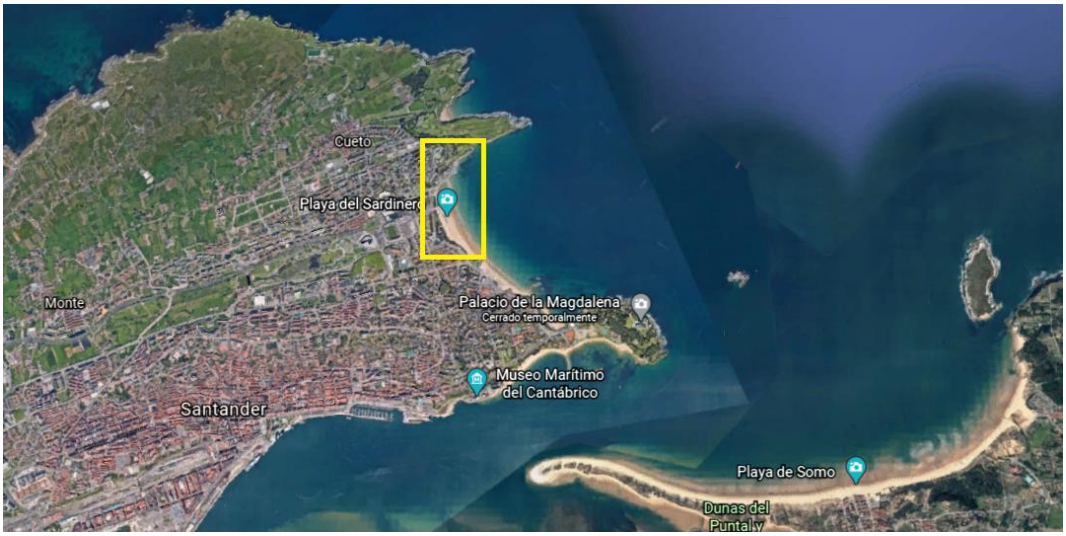


Figura 55. Localización Santander [85]

3.2.- Material y diseño

El material empleado para fabricar dicha barandilla es acero al carbono [86]. Los aceros al carbono no tienen casi elementos de aleación, por lo que están compuestos principalmente de hierro y carbono, con los elementos químicos inherentes al proceso de manufactura, tales como S, Mn, P y Cu.

El acero al carbono que compone la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero se protege frente a la corrosión mediante la aplicación de una capa de material orgánico o pintura a modo de recubrimiento, para ejercer ese papel de barrera física entre el acero y el ambiente marino.

En la Figura 56 se muestra la pintura azul utilizada para el recubrimiento de la barandilla objeto de este Trabajo. Se trata de un esmalte sintético de secado rápido con buen brillo y retención de color. Se suele utilizar como capa de acabado en acero expuesto a ambientes corrosivos bajos o moderados [87]. Esta información ha sido proporcionada por la propia empresa encargada de pintar la barandilla del Sardinero, contacto obtenido a través del Ayuntamiento de Santander tras varios intentos, tanto por correo electrónico como por teléfono.

Figura 56. Recubrimiento utilizado para proteger la barandilla Segunda Playa del Sardinero [87]

Un dato muy importante que reflejar en este Trabajo es que la barandilla se recubre todos los años, previamente a la temporada de verano, con el recubrimiento orgánico mencionado. Este recubrimiento debería aplicarse tras una inspección exhaustiva del estado de la estructura, pero conocemos, a ciencia cierta, pues lo hemos visto "con nuestros propios ojos", que esto no llega a realizarse ningún año, sino que se procede a pintar la barandilla sin llevar a cabo ningún tratamiento previo, lo que da lugar a su continuo deterioro. Concretamente este año se ha comenzado a trabajar en su puesta a punto en los meses de Abril y Mayo, coincidiendo con la desescalada de la pandemia ocasionada por la Covid19 [88][89].

La primera Zona elegida, desde los Jardines de Piquío hasta la rotonda inicial de la Avenida Manuel García Lago (Zona Parque Mesones), se corresponde con la Playa propiamente dicha, toda la zona está separada del mar por arena, alrededor de 80 metros de ancho con niveles medios de marea. La corrosión es mínima, aun así, presenta zonas donde la última capa de pintura se ha levantado y deja a la vista otras capas más antiguas, con colores verdosos y grisáceos.

En la Figura 57 se muestra un trozo de barandilla de dicha zona crítica donde el deterioro es mínimo en comparación con las siguientes zonas, pues el mar no actúa directamente sobre ella, aunque si lo hacen los distintos agentes atmosféricos, como pueden ser la lluvia y el viento o acciones humanas (rayones, arañazos, suciedad, etc.).

Figura 57. Tramo barandilla Zona Parque Mesones

En la Figura 58 se presenta un trozo de barandilla correspondiente a esta primera zona crítica, en la que se ve el resultado de la aplicación, año tras año, de distintas capas de pintura sin apenas mantenimiento o preparación previa.

Figura 58. Estado de la barandilla de la Zona 1 (Elaboración propia)

La segunda Zona elegida es la correspondiente a la recta de la Avenida Manuel García Lago, desde la rotonda hasta el Monumento a El Montañés. Aquí, a los agentes atmosféricos, se suman los asiduos golpes de mar, lo que provoca un alto grado de corrosión en referencia a la primera de las Zonas.

En la Figura 59 se muestra una vista general de un tramo de barandilla de esta segunda zona crítica; en ella se aprecian los restos que deja la corrosión del metal en la piedra de la base, así como las concentraciones de zonas de elevados niveles de corrosión en las uniones con los pilotes.

Figura 59. Tramo barandilla recta Avenida Manuel García Lago

Esta zona ha sido la primera en pintarse durante la realización del presente Proyecto; tal y cómo se aprecia en la Figura 60, la aplicación de recubrimientos protectores, sin realizar un tratamiento previo de eliminación de productos de corrosión, restos de pinturas previas, suciedad, sales, etc., provoca la aparición de ampollas y burbujas de aire que se manifiestan en la superficie del metal con el paso de los días.

Figura 60. Estado de la barandilla a los pocos días de pintarla (Elaboración propia)

También hay que destacar la desaparición, en muchas de las uniones de las barandillas que forman esta zona crítica, de los pernos y tornillos de fijación (Figura 61).

Figura 61. Desaparición o deterioro de los pernos de fijación en distintos tramos de la barandilla (Elaboración propia)

La tercera zona elegida, podemos afirmar, tras un control visual, que será la más crítica en cuanto a corrosión se refiere, pues es la más cercana al mar y la barandilla está en contacto casi continuo con las sacudidas y golpeteo de las olas o *splash*.

En la Figura 62 se muestra un trozo de la barandilla de la tercera zona crítica, apreciándose cómo el deterioro es extremo, llegando al punto de poder causar graves accidentes, pues son varios los tramos de barandilla inexistentes. En la zona derecha de la imagen se puede observar la ausencia total de protección para los viandantes.

Figura 62. Tramo de barandilla Zona Ensenada del Sardinero (Elaboración propia)

Se muestra en la Figura 63 el estado de las zonas de unión correspondientes con esta zona crítica.

Figura 63. Estado del interior de las zonas de unión para la tercera zona crítica (Elaboración propia)

A continuación, se define la terminología a utilizar, previamente a comenzar el análisis del grado de corrosión a lo largo de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, pues, ante todo, es necesario comprender desde un principio los procesos con los que se ha trabajado.

3.3.- Terminología

Antes de comenzar con la descripción del procedimiento de este trabajo, es necesario referir brevemente la terminología utilizada, así como la forma en la que se van a seleccionar los distintos grados de corrosión.

En todas las fotografías tomadas se distinguen distintos niveles de corrosión, desde zonas donde el material aún no ha comenzado a sufrir dicho fenómeno, otras donde la falta local de recubrimiento provoca la reacción directa entre el metal o substrato y el electrolito, produciéndose óxidos voluminosos que dan lugar al ampollamiento de la pintura y, por último, zonas donde la destrucción del material, debido al alto grado de corrosión, es total.

En la Figura 64 se muestran, a modo de ejemplo, las distintas etapas de corrosión que puede sufrir la barandilla.

A: Material que aún no ha comenzado a sufrir corrosión.

B: Aparición de ampollas y picaduras, comienzo y desarrollo de la corrosión.

C: Desaparición y destrucción total del material debido al fenómeno de corrosión.

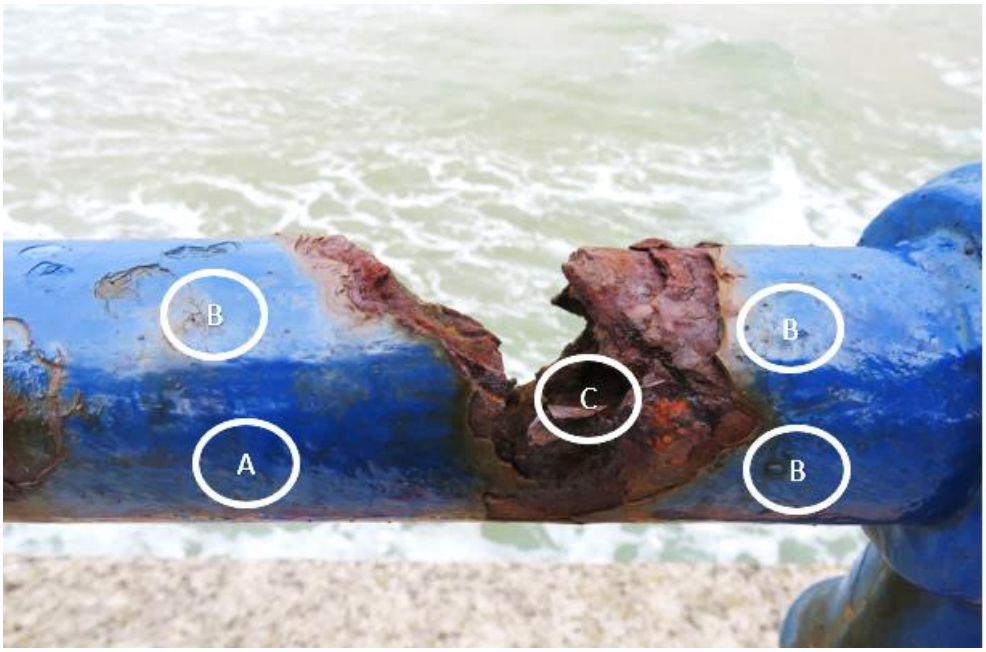


Figura 64. Distintas zonas de corrosión en un mismo trozo de barandilla (Elaboración propia)

La rotura total, o fallo de la barandilla provocado por la corrosión, aparece frecuentemente en tramos de barandilla correspondiente a las denominadas Zona 2 y Zona 3, dentro de las zonas críticas en las que se ha dividido este Proyecto Fin de Máster. Esta ocurrencia peligrosa es muy habitual en las zonas inferiores de las barandillas o en extremos de unión de distintos tramos. En dichos elementos la destrucción del material es total y se presenta la barandilla perforada.

En la Figura 65 se puede ver ese tipo de rotura, en este caso en la parte inferior de un tramo de barandilla correspondiente a la Zona 2. El orificio y la descamación progresiva del material aparecen cerca de la unión de la barra de metal con el pilote de hormigón.

Figura 65. Rotura grave del material con detalle de descamación progresiva de las capas de pintura y los óxidos de hierro (Elaboración propia)

Tras mostrar el aspecto que presenta cada tipo de descamación, rotura o picadura, se describen éstas en función de dicho aspecto y de los detalles más característicos:

- Nueva picadura: Estas picaduras son casi inapreciables a simple vista y es fácil confundirlas con óxido residual presente en la superficie. El diámetro medio de dichas picaduras varía en función del tramo de barandilla. Suelen generarse en zonas débiles donde la capa pasiva ha desaparecido y apenas ocupan espacio.

En la Figura 66 se pueden apreciar una especie de “nuevas picaduras” en un tramo de barandilla de la Segunda Playa del Sardinero. La aparición de estas sucede una zona que ha sido recientemente pintada, por lo que las nuevas picaduras reaparecen en la superficie como pequeñas ampollas. Previo al tratamiento orgánico a aplicar en las estructuras es estrictamente necesario retirar de la superficie los productos de corrosión, así como las capas de pintura ampolladas, este procedimiento no se ha seguido en el caso que estamos tratando, por lo que las ampollas reaparecen tras un periodo de tiempo mínimo. Ello es debido al carácter higroscópico [90] de la pintura, que facilita el acceso de agua y oxígeno al substrato metálico, formándose óxidos e hidróxidos de hierro muy voluminosos, de color, rojizo, marrón [91][92].

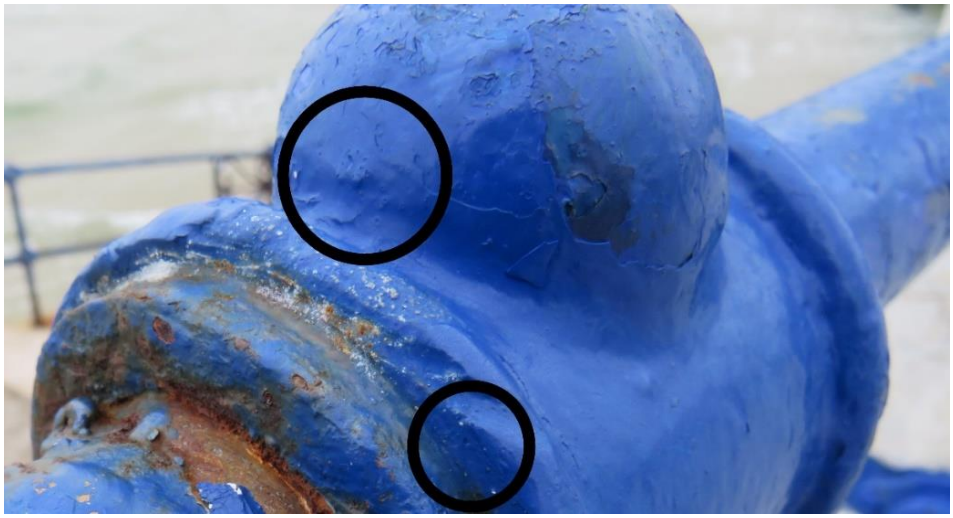


Figura 66. Picaduras iniciales (Elaboración propia)

- Picadura avanzada: Las nuevas picaduras, derivadas de la pérdida local de la capa protectora de recubrimiento, aumentan su diámetro a lo largo del tiempo, hasta que se pueden apreciar sin dificultad a simple vista.

En la Figura 67 se muestra un trozo de acero perteneciente al anillo que rodea los pilotes y hace de unión con los tramos de barandilla, en el que se pueden apreciar picaduras avanzadas.

Figura 67. Picaduras avanzadas (Elaboración propia)

- Colapso de picadura y grietas de corrosión: Los colapsos ocupan el mayor volumen de corrosión en la superficie y, en el caso de la barandilla objeto de estudio, es el tipo de corrosión más habitual; su deterioro es tal que, prácticamente todos los tramos de barandilla presentan dicho fenómeno. Se pueden generar por diferentes motivos, entre los que destacan los recogidos a continuación:

- Por acumulación de picaduras contiguas. Las nuevas picaduras evolucionan próximas a las picaduras avanzadas, hasta llegar a juntarse. Como resultado de estas uniones resultan zonas de gran diámetro.
- Por generación de grietas en el recubrimiento. Este tipo de corrosión, un tanto peculiar, se genera con la presencia de picaduras adyacentes o contiguas, pero que no se llegan a tocar al crecer, sino que aparece una especia de hilo o grieta de oxido uniéndolas, esto da lugar a una corrosión generalizada en el acero y a la pérdida de adherencia de la capa protectora a lo largo de toda la estructura. Las grietas crecen tanto en longitud como en espesor, llegando a crear el colapso de una forma, más peligrosa aún que el colapso por picadura debido a picaduras adyacentes.

En la Figura 68 se presenta una zona de la barandilla donde aparecen grietas debidas a los productos de corrosión sobre el substrato. Estos productos de corrosión del acero son altamente higroscópicos, es decir, absorben con facilidad la humedad.

Figura 68. Grietas por corrosión del metal (Elaboración propia)

En la Figura 69 se muestra un tramo de barandilla en el que el colapso por una corrosión generalizada que ha avanzado rápidamente, al verse desprovista de la capa de

recubrimiento, dando lugar a un aspecto de picadura de elevado diámetro, llegando incluso a la pérdida de material.

Figura 69. Colapso por picadura (Elaboración propia)

Estas etapas de corrosión son meros ejemplos; en el Apartado 3.5.5 se recogerá el código de medida del grado de corrosión creado para este Trabajo Fin de Máster, en el que se muestra más detallado el proceso de corrosión que existe en cada trozo o tramo de barandilla. Este código se desarrolla a partir del procesamiento con Matlab de todas las imágenes tomadas.

Una vez explicados los distintos tipos de picaduras, causantes de una corrosión generalizada, y que dan lugar a la pérdida de adherencia de la capa de protección, que se pueden encontrar a lo largo de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, y tras realizar la inspección visual inicial del entorno, es momento de proceder a la toma de fotografías que nos permitan trabajar con el software matemático Matlab. El proceso de adquisición de imágenes, base fundamental en el desarrollo del presente Proyecto, se presenta a continuación.

3.4.- Adquisición de imágenes de los elementos estructurales corroídos

Una vez seleccionadas las tres zonas críticas mediante inspección visual y, tras identificar los elementos estructurales que presentan corrosión, se procede a la toma de imágenes fotográficas que serán analizadas posteriormente con Matlab. Inicialmente se han realizado alrededor de 900 imágenes, de las que fueron descartadas aquellas de peor calidad, ya que podrían dar lugar a confusión en el análisis fotográfico.

Para la toma de fotografías se ha utilizado una cámara de fotografía de alta resolución de la marca Canon, concretamente la Canon PowerShot SX540 HS, cuyas características principales son el gran zoom óptico 50x con ultra gran angular de 24 mm del que dispone, permitiendo una obtención de imágenes nítidas y claras con cualquier condición de luz posible gracias a su sensor CMOS de 20,3 megapíxeles. Tiene un procesador DIGIC 6, y gracias al enfoque automático se pueden captar acciones espontaneas de 0,13 s y con un rápido disparo en serie de 5,9 fps. En la Figura 70 se presenta la cámara descrita.

Figura 70. Cámara Canon PowerShot SX540 HS empleada en el presente Proyecto

La correcta toma de imágenes es un paso importante para el desarrollo del presente Proyecto, es necesario evitar la presencia de sombras e irregularidades a la hora de convertir las fotografías tomadas a imágenes binarias mediante la aplicación Color Threshholder de Matlab.

En la Figura 71 se muestra un esquema del método seguido para proceder al análisis fotográfico de las imágenes tomadas a lo largo de La Segunda Playa del Sardinero. Desde la identificación visual inicial de las distintas zonas críticas, hasta la selección y el descarte de las imágenes válidas o, por el contrario, erróneas.

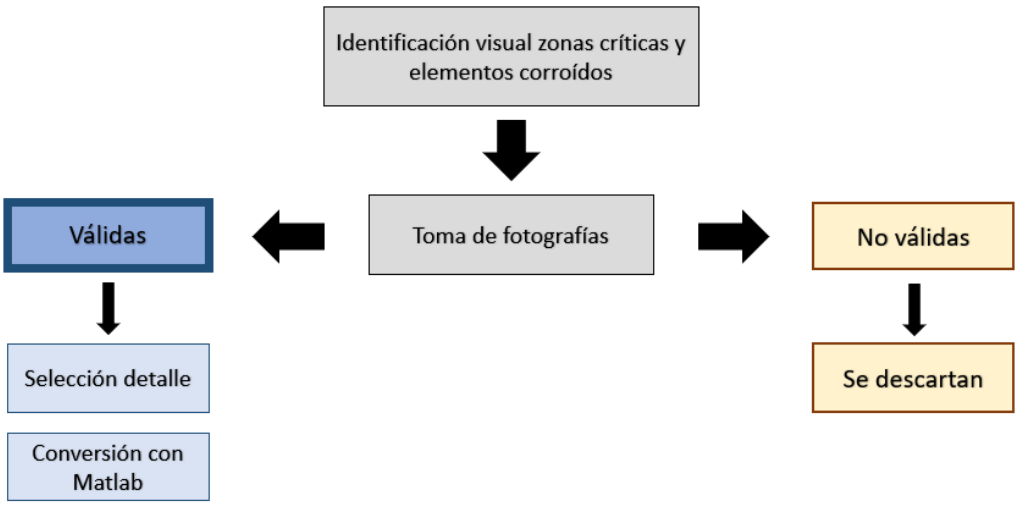


Figura 71. Etapas para la adquisición de imágenes de los elementos corroídos (Elaboración propia)

Se denominan imágenes validas todas aquellas que muestren con nitidez y claridad el estado de las superficies, prestando gran atención en los tramos de cada zona donde la barandilla está más corroída, dejando a un lado los tramos donde la corrosión está oculta aún bajo la última capa de pintura.

3.4.1.- Toma y selección de fotografías en cada zona crítica

Con la adquisición de fotografías tratamos de realizar un barrido de cada una de las zonas críticas seleccionadas para, posteriormente, medir las áreas libres de corrosión y aquellas ocupadas por grietas y por picaduras causantes de una corrosión generalizada. Como se había mencionado, se seleccionan aquellas imágenes de mejor calidad y con ausencia de sombras, para su correcto análisis fotográfico. Este paso de realización y clasificación de las fotografías es muy importante, ya que la confusión a la hora de clasificar una imagen dentro de la zona crítica que no corresponde alteraría las variables obtenidas tras aplicar el Método *Fuzzy*.

Inicialmente se tienen el siguiente número de imágenes:

Zona 1: 250 imágenes

Zona 2: 361 imágenes

Zona 3: 239 imágenes

Resaltar que no todas las imágenes son para analizar, sino que también se recogen aquellas utilizadas para el desarrollo de la memoria. La selección de las más adecuadas concluye con los siguientes datos, que hacen un total de 90 imágenes analizar.

Zona 1: 30 imágenes

Zona 2: 30 imágenes

Zona 3: 30 imágenes

Una vez seleccionadas las imágenes a analizar en cada zona de trabajo, han de procesarse cada una de ellas como se indica a continuación.

3.4.2.- Procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes es un método empleado para mejorar la información que contiene cada una de ellas, y así obtener imágenes semejantes, pero que sean más sencillas, en función de su valoración y clasificación en los distintos grados de corrosión.

Previo al procesamiento, las imágenes pasan por las dos fases de acondicionamiento previo, recogidas a continuación:

- Preparación de las imágenes.

  Anterior a la segmentación de las imágenes en Matlab, es necesario prepararlas, y se seleccionan las zonas de estas que interesa analizar. Para esto se recortan los detalles elegidos con la siguiente geometría, en la cual la base es igual a tres veces su altura.

En la Figura 72 se muestra una de las imágenes que ha sido preparada para su posterior análisis, el rectángulo negro presenta la zona crítica elegida. Se procederá al recorte único y exclusivo de dicha zona seleccionada.

Figura 72. Preparación de imágenes, imagen real (Elaboración propia)

En la Figura 73 se presenta únicamente el detalle a analizar en Matlab.

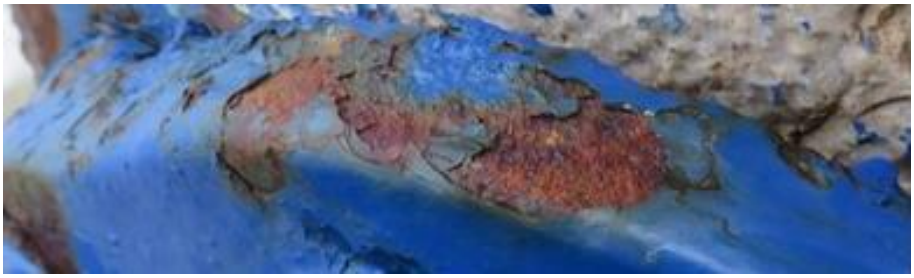


Figura 73. Preparación de imágenes, detalle (Elaboración propia)

Las imágenes como las de esta última Figura son las que se procesan con Matlab para posteriormente clasificarlas en función de su grado de corrosión.

- Segmentación de las imágenes mediante Matlab.

  Matlab es la abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices", y se trata de un software matemático usado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo, que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) [93].

  Este software recoge herramientas de análisis de datos, desarrollo de algoritmos, procesamiento de señales y de imágenes, visión artificial,

comunicaciones, finanzas, etc. y que está presente en sistemas de seguridad de automóviles, naves espaciales, dispositivos de monitorización de la salud, redes eléctricas inteligentes y redes móviles LTE [94].

Image Processing Toolbox™ [95] proporciona un conjunto completo de algoritmos estándar de referencia y aplicaciones de flujo de trabajo que permiten el procesamiento, el análisis y la visualización de imágenes, así como el desarrollo de algoritmos. Se puede llevar a cabo la segmentación de imágenes, la mejora de imágenes, la reducción de ruido, transformaciones geométricas, el registro de imágenes y el procesamiento de imágenes 3D. Estas aplicaciones nos permiten automatizar los flujos de trabajo, segmentar datos de distintas imágenes, comparar técnicas de registro de imágenes y procesar por grupos conjuntos de datos de forma interactiva.

La aplicación concreta que utilizar en el presente trabajo es *Color Thresholder*, que permite manipular los componentes de las imágenes en función de los diferentes espacios de color de los que se forman.

Tras la toma y preparación inicial de las imágenes, se procede a trabajar con cada una de ellas para calcular así las distintas variables con las que se trabajara en el Método *Fuzzy*. A continuación, se describe el proceso a seguir para el cálculo de dichas variables.

3.5.- Cálculo de variables

Como ya se ha mencionado, el cálculo y extracción de las variables a introducir en el Método *Fuzzy* se realizará mediante Matlab, empleando algoritmos de segmentación capaces de diferenciar cada una de las áreas distinguidas: libre de corrosión, ocupada por grietas y picaduras, corrosión incipiente y rotura o fallos causados por corrosión.

3.5.1.- Procesado digital y análisis de imágenes

El procesado digital de imágenes (PDI) se encarga de almacenar, transmitir y representar la información de imágenes digitales por medio de una computadora digital [93].

Una imagen se puede definir como, una función bidimensional de intensidad de luz, f(x, y), en la que x e y representan las coordenadas espaciales, y el valor de f en cualquiera que sea un punto (x. y), es proporcional a la intensidad de la imagen en dicho punto. Se

puede representar una imagen digital como una matriz, en las que los índices de fila y columna corresponden con un punto de la imagen y, cuyo valor, es coincidente con el nivel de luz presente en dicho punto. Se denomina píxel a cada uno de estos elementos del vector que se corresponde con un elemento de la imagen [28].

Principalmente, el procesado digital de imágenes se centra en los dos objetivos siguientes:

- Una mejora de la información que contiene una imagen, para facilitar la comprensión e interpretación por parte de las personas.
- El tratamiento de los datos de una escena, para favorecer la percepción autónoma por parte de una máquina.

Por otro lado, el análisis de imágenes se refiere al proceso marcado por la extracción cuantitativa de información de la imagen, cuyo resultado es siempre una tabla de datos, una gráfica o cualquier otra forma de representación numérica. Sin embargo, en el procesado de imágenes el resultado obtenido es siempre otra imagen, es decir, se mejora la calidad de una imagen con el fin de obtener una nueva en la que se aprecien mejor los detalles.

Los tipos de procesos implicados en el procesado y el análisis de imágenes se clasifican en tres grupos o niveles [28]:

- Nivel bajo (procesado). Estos procesos incluyen una reducción del ruido, una mejora en el contraste y una mejora global de las características o propiedades de la imagen. En este nivel todas las entradas y salidas son imágenes.
- Nivel medio (análisis). Los procesos de nivel medio analizan los niveles bajos y trabajan con la segmentación (regiones, objetos). Se centran en la descripción de los objetos y su clasificación. En estos procesos la entrada es siempre una imagen, sin embargo, la salida son atributos de los objetos (bordes, identidades, contornos, etc.)
- Nivel alto. Los procesos de este nivel se orientan hacia la interpretación de los elementos obtenidos en niveles inferiores, toman gran importancia la comprensión, el entendimiento y la toma de decisiones.

En relación con esta clasificación, se denomina procesado digital de imágenes a aquellos procesos en los que las entradas y salidas son imágenes (procesos de nivel bajo) y

también a aquellos en los que se extraen atributos de imágenes y se reconocen objetos individuales (procesos de nivel medio).

El procesado digital se utiliza en multitud de áreas de manera habitual. La principal fuente de energía de las imágenes es el espectro electromagnético (EM), con especial énfasis en la banda de rayos X y en la banda visible. Otras de las fuentes son la acústica, la ultrasónica y la electrónica. En la Figura 74 se muestra un resumen para ayudar en la comprensión de qué es el EM donde la longitud de onda (λ) está representada en metros.

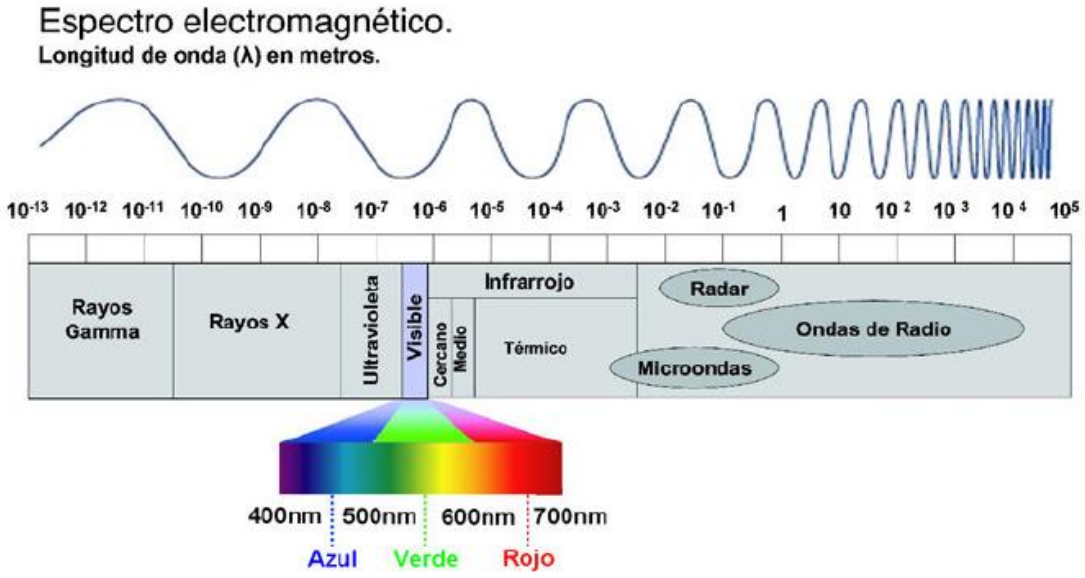


Figura 74. Espectro electromagnético [93]

Los pasos esenciales que seguir en el procesado de imágenes con cada una de ellas son los siguientes:

1. Adquisición
2. Mejora
3. Restauración
4. Procesado del color
5. Ondículas
6. Compresión
7. Operaciones morfológicas
8. Segmentación
9. Representación y descripción
10. Reconocimiento/Etiquetado

3.5.2.- Imagen digital. Conceptos básicos

Algunos conceptos, como el formato, la resolución o la profundidad de color son fundamentales para comprender qué es y cómo funciona la imagen digital.

Son dos los **tipos de imágenes** que debemos diferenciar: mapa de bits y gráficos vectoriales, de los que se hablará a continuación [96].

- El mapa de bits o matriciales: la imagen se representa por puntos rectangulares muy pequeños llamados píxeles. A partir de conjuntos de píxeles se forman las imágenes y, a su vez, cada pixel se representa por bits de información. Es importante distinguir entre tamaño de imagen y tamaño de archivo, que es el espacio que ocupa el archivo que contiene la información de la imagen (peso de la imagen). Los parámetros importantes para este tipo de imágenes son: píxel, resolución, profundidad de color en bits, etc.
- Gráficos vectoriales: las imágenes son tratadas como objetos, y se definen a través de fórmulas matemáticas. Estos objetos gráficos pueden agruparse, transformarse y componerse en objetos *renderizados*. Al renderizar o representar gráficamente una imagen, se genera, mediante un proceso de cálculo complejo, una imagen 2D a partir de una escena 3D.

La principal diferencia entre estos tipos de imágenes está en la capacidad de los gráficos vectoriales para experimentar modificaciones y transformaciones geométricas, a diferencia de los mapas de bits, en los que las imágenes no pueden someterse a dichas transformaciones sin experimentar la pérdida de información.

El uso del color es muy importante en el procesado de imágenes y viene motivado por dos factores [97]:

- El color ayuda a describir, simplificar y extraer los objetos de una escena
- Los humanos somos capaces de distinguir entre miles de colores, mientras que sólo percibimos veinticuatro niveles de gris. El ojo humano nos permite reconocer en una imagen los colores combinación de los llamados clores primarios: R (Red/Rojo), G (Green/Verde) y B (Blue/Azul).

El **modo de color** expresa la cantidad máxima de datos de color que pueden almacenarse en un determinado formato de archivo gráfico, y su objetivo consiste en facilitar la especificación de los colores de una forma normalizada. Para percibir el color de un cuerpo

o un objeto es necesaria la presencia de luz, por lo que el espectro visible, es decir, el rango de longitudes de onda que dentro del espectro electromagnético el ojo humano es capaz de detectar, adquiere gran importancia cuando hablamos de imágenes digitales y color [28] [96].

En la Figura 75 se muestra el espectro visible que recoge los espacios de color más conocidos y utilizados [98].

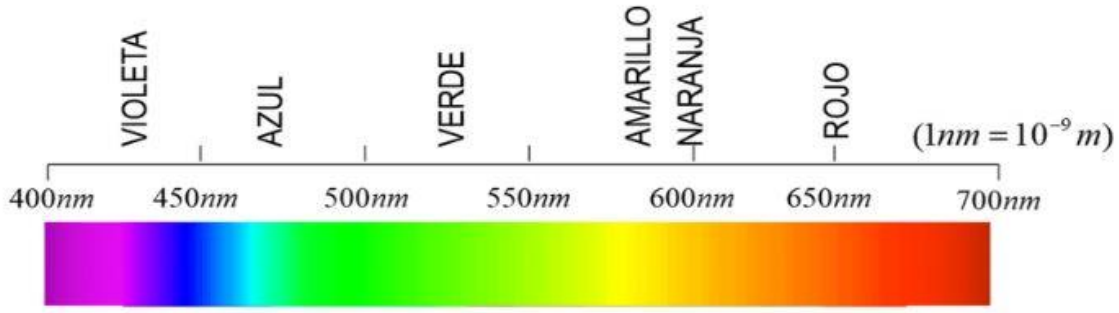


Figura 75. Espectro visible [98]

Son cuatro los modelos o espacios de color existentes y con los que trabajaremos en el entorno *Color Thresholder* de Matlab [73] [96] [99]:

- Espacio RGB (*Red Green Blue*). Es uno de los espacios más utilizados. Su nombre viene de las iniciales en inglés de los colores Rojo, Verde y Azul y se basa en la capacidad de la que dispone el ojo humano para distinguir entre estos tres colores primarios. La base principal del funcionamiento de una imagen en color RGB es la matriz dimensional de una imagen en blanco y negro, esta matriz se compone de los valores de luminancia de cada píxel. Si trabajamos con 8 bits obtenemos un total de 256 valores posibles para cada píxel. Estos valores se traducen en diferentes tonos de grises, cubriendo así toda la escala de grises, desde el valor 0 (negro) hasta el valor máximo, 255 (blanco).

  La matriz mencionada, en el caso del espacio RGB, es una matriz tridimensional, compuesta por 3 planos correspondientes a cada uno de los tres colores primarios que forman dicho espacio. Cada plano de color se asemeja a una imagen en blanco y negro, donde el valor de 255 es el máximo, color puro, y los valores que van de 0 a 254 son distintas tonalidades de este color. Cada uno de los tres planos trabaja con 8 bits, pero al disponer de una matriz tridimensional, las variables posibles alcanzan las 16777216.

En la Figura 76 se representa el espacio RGB, donde la suma de los tres colores primarios puros, es decir los tres planos de color con valor 255, da como resultado el blanco puro, mientras que, de la ausencia de color, es decir un valor 0 en los tres planos, obtendríamos un color negro puro.

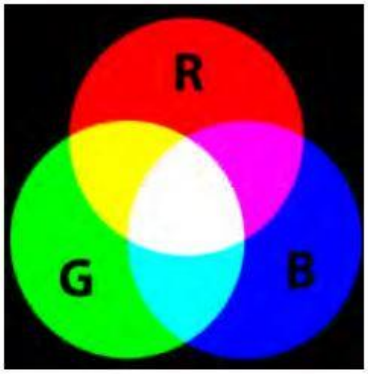


Figura 76. Espacio RGB [30]

- Espacio CMYK. El nombre de este espacio proviene de las iniciales de Cian, Magenta y Amarillo en inglés. La suma de todos los colores da, en este caso, el negro, que se refleja con la letra K, mientras que la ausencia de colores genera el blanco. El espacio CMYK está compuesto por los colores complementarios a los tres primarios y es el espacio que se emplea en la imprenta. El negro que se obtiene como resultado no es un negro puro es, más bien, marrón oscuro, por lo que suele añadírsele un cartucho especial negro, dando así origen al CMYK. En la Figura 77 se muestra el espacio CMYK.

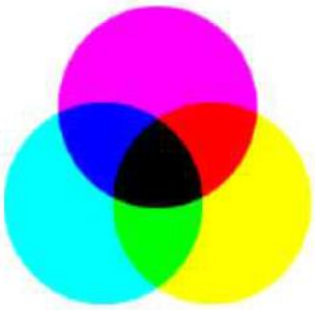


Figura 77. Espacio CMYK [30]

- Modelo HSV (*Hue Saturation Value*) y HSL (*Hue Saturation Lightness*). Estos modelos incluyen otros dos parámetros al matiz, que son la saturación, en ambos y el valor, en HSV, o la luminosidad, en HSL. La diferencia entra ellos es que en HSV, la saturación va del color puro al blanco, mientras que en HSL va del color

puro al gris medio. Y en el tono, en HSV va desde el negro al color y en HSL desde el negro al blanco. El HSL es el más utilizado en fotografía.

La matriz del modelo HSV se representa en una región circular, cuyo centro es el color blanco, y donde el nivel de saturación viene marcado por la distancia desde el centro al color de la región circular. Cada color primario está separado del otro 120º y los espacios resultantes dan lugar a los colores mixtos.

Para representar el color negro, es necesaria una tercera variable, el brillo, que simboliza la altura del eje blanco-negro, siendo el negro puro el valor cero.

En la Figura 78 se muestra el espacio de color HSL (*Hue Saturation Value)* mediante su cono de colores.

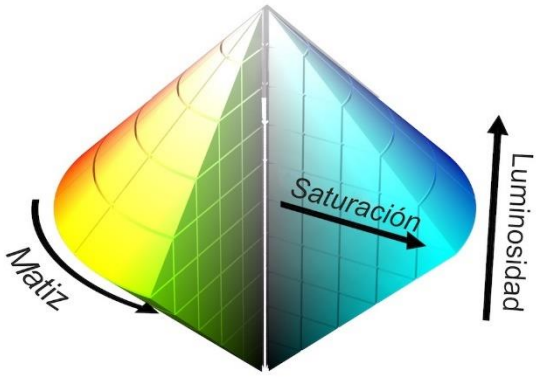


Figura 78. Espacio de color HSV [97]

A continuación, se explican los constituyentes Matiz, Saturación y Valor en coordenadas cilíndricas:

- Matiz: se representa como un ángulo donde los valores van de 0 a 360º. Cada valor se corresponde con un color, 0 es el rojo, 60 es el amarillo y 120 el verde. Por lo tanto, en coordenadas tendríamos:

  RGB (1,0,0) = 0º

  RGB (1,1,0) = 60º

  RGB (0,1,0) = 120º

  RGB (0,1,1) = 180º

  RGB (0,0,1) = 240º

  RGB (1,0,1) = 300º

  0º = 360º

- Saturación: distancia al eje de brillo negro-blanco y sus valores posibles están ente el 0 y el 100%. También se ~~le~~ conoce como pureza, debido a la semejanza con la pureza de excitación y la pureza colorimétrica de la colorimetría. Un color estará más decolorado cuanto menor sea su saturación. Por lo que definimos la *instauración*, en términos cualitativos, como la inversa de la saturación.
- Valor: Representa la altura en el eje blanco-negro y sus valores van del 0 al 100%. El 0 es negro siempre, mientras que el blanco depende de la saturación.

- Espacio L*a*b. Es un modelo basado en la percepción que tiene el ojo humano acerca del color y fue diseñado para ser independiente del dispositivo en el que se utilice, ya sea impresora o pantalla. Se crean colores resistentes a los errores, separando la luminosidad (L), de los dos canales cromáticos (a y b). Cabe destacar que la representación visual de la gama de colores en este espacio no es exacta, sirve únicamente como referencia.

  El número de valores numéricos posibles por cada pixel es menor en L*a*b que en RGB o CMYK, pero a su vez nos permite referenciar colores que no aparecen en el mundo real, colores imaginarios de gran utilidad a la hora de manipular imágenes.

  El modelo de color L*a*b es tridimensional, por lo que la única forma de representarlo correctamente es en un espacio como el que se muestra en la Figura 79. A la izquierda se representa el plano ab para L= 0.25, en el centro el plano ab para L=0.5 y a la derecha el plano ab para L=0.75.

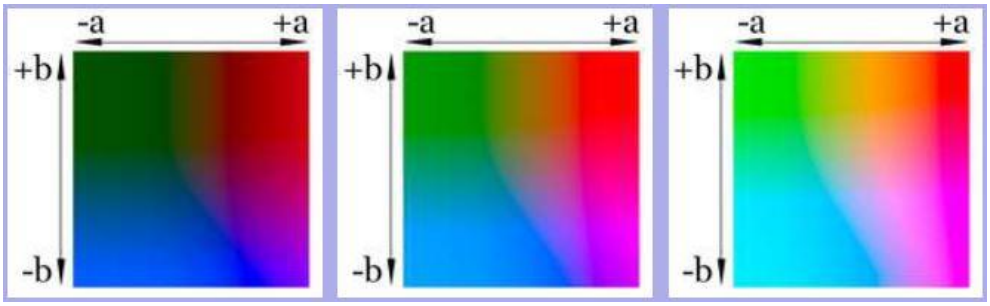


Figura 79. Espacio de color L*a*b [96]

3.5.3.- Espacio de color empleado en el presente Proyecto

Como se había mencionado con anterioridad, las fotografías del presente Proyecto Fin de Máster, "Evaluación de la degradación por corrosión de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, Santander, España, mediante Lógica *Fuzzy*", fueron tomadas todas el mismo día, concretamente el Jueves 14 de Mayo, buscando que no hiciera un día muy soleado, pues esto permite evitar la aparición de sombras y rayos en las mismas. Esto consiente al mismo tiempo que la iluminación y la saturación de todas las imágenes sea similar.

El objetivo del proyecto es el de comparar las tres zonas críticas que han sido diferenciadas, por lo tanto, es necesario que las condiciones entre ellas se puedan cotejar. A pesar de realizar todas las fotografías el mismo día, el problema más trascendental que se ha encontrado es la diferencia de saturación e iluminación que se presenta entre algunas de ellas, principalmente debido a la distinta luminosidad de cada zona y a la diferencia de momentos del día. Es por esto por lo que se ha utilizado un espacio de color que permite las comparaciones objetivas en casos como el que se presenta.

La *saturación* es la intensidad cromática o pureza de un color. Cuando un color pertenece a un círculo cromático, tiene el máximo poder de pigmentación y se dice que está saturado. Para cambiar el grado de saturación de un color es necesario mezclarlo con su complementario, es así como se obtiene la escala de grises o escala de saturación. Un color muy saturado tiene un color vivo, mientras que un color poco saturado tiene una apariencia descolorida y grisácea. La saturación se determina por una combinación de su intensidad luminosa junto con las diferentes longitudes de onda en el espectro de colores. La máxima saturación corresponde con la propia longitud de onda del espectro electromagnético y carece de blanco y negro. La pérdida de saturación de un color puede conseguirse añadiéndole blanco o mezclándolo con su complementario, se obtendría como resultado un color neutro [100].

En la Figura 80 se muestra la saturación del color rojo, a la izquierda tenemos la menor saturación posible, representada por un tono grisáceo. Sin embargo, a la derecha obtenemos el color más vivo posible, su máxima saturación.

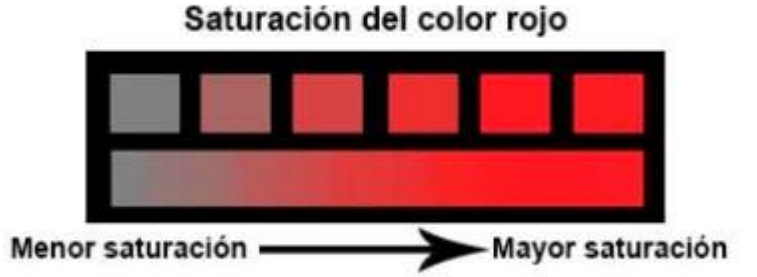


Figura 80. Saturación del color rojo [100]

La *iluminación* o el brillo se define como la capacidad que posee un color para reflejar la luz blanca que incide sobre él. Apunta a la claridad u oscuridad de un tono. La toma de fotografías en el presente Proyecto se realiza en su totalidad al aire libre, por lo que no tenemos ninguna fuente de iluminación externa, más allá de la luz natural [100].

De los espacios de color mencionados previamente, se descarta el Espacio RGB debido a la arbitrariedad de su valor de saturación lo que nos plantearía distintos problemas. El espacio RGB tiene saturación máxima si dispone de 100% de luminosidad en el canal rojo y 0% en el resto y su espacio colorimétrico no es absoluto. Como la saturación es uno de los parámetros de las coordenadas en los sistemas de color HSL y HSV, elegimos el HSV como espacio de color idóneo para el presente Proyecto. Este modelo nos permite seleccionar manualmente las distintas tonalidades de color que se necesiten, así como realizar ajustes en la saturación [28][73].

3.5.4.- Segmentación de imágenes

La segmentación de imágenes trata de descomponer una imagen en sus partes constituyentes, centrándose en las características que permiten distinguirla, es decir, sus partes más significativas. Mediante este proceso se asigna una etiqueta a cada píxel de la imagen, de forma que los pixeles que compartan etiqueta tendrán unas características visuales similares. Podemos distinguir dos tipos de segmentación: completa y parcial. En la segmentación completa, las regiones disjuntas se corresponden directamente con objetos. Sin embargo, en la segmentación parcial, las regiones no se corresponden directamente con objetos de la imagen [101].

En este Trabajo Fin de Máster se procede a aplicar una segmentación parcial de cada una de las imágenes, esto nos permitirá extraer la información más importante una por una,

y almacenar los datos obtenidos en las tablas correspondientes, como la presentada en el Apartado 3.5.5.

En la segmentación se distinguen dos tipos de algoritmos, los orientados a regiones y los orientados a los bordes, basados en tres propiedades [28][97]:

- La discontinuidad presente en los tonos gris de los píxeles de un entorno, lo que permite detectar posibles puntos aislados, líneas y bordes.
- La similitud en los tonos de gris de los píxeles de un entorno, que permite la construcción de regiones mediante división y fusión, por crecimiento o por umbralización.
- La conectividad presente entre los píxeles, pues una región de pixeles está conectada si, para cada par de éstos, existe un camino formado por esa región que los conecta.

Los algoritmos orientados a regiones son de distintos tipos, entre los que caben destacar los siguientes [97]:

- Umbralización de regiones
- Crecimiento de regiones
- Partición y fusión de regiones

Los algoritmos orientados a los bordes se recogen en tres tipos diferentes [97]:

- Detección de bordes en imágenes monocromáticas
- Detección de bordes en imágenes en color
- Evaluación de algoritmos de detección de bordes en color

Como procesos a destacar en la realización del presente Trabajo, se recogen los siguientes:

1. <u>Segmentación mediante detección de bordes</u>

   Los algoritmos orientados a los bordes tratan de extraer los objetos de la imagen, localizando sus contornos o fronteras. La imagen de salida generada se llama mapa de bordes, y puede incluir información acerca de la posición, la fuerza o intensidad y la orientación. Los bordes se corresponden con discontinuidades en algún atributo de la imagen; para su detección se emplean atributos tales como la intensidad luminosa de los niveles de gris de la imagen y el color. Algunas de las

causas físicas de los bordes son la iluminación, los reflejos, las sombras, la geometría de los objetos, la profundidad de estos, la textura o los cambios de color [101].

Un punto aislado de una imagen tiene un tono de gris diferente al de sus píxeles vecinos, es decir, a los 8 píxeles de su entorno 3x3. Un ejemplo de máscara que nos permite detectar un punto aislado se detalla a continuación:

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Aplicando esta máscara al píxel (i, j) obtenemos la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} g(i,j) = {} & -f(i-1,j+1) - f(i+1,j+1) - f(i-1,j) + 8f(i,j) \\ & - f(i+1,j) - f(i-1,j-1) - f(i,j-1) - f(i+1,j \\ & - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

Por lo tanto, el píxel (i, j) será un punto aislado si:

$$|g(i,j)| > T \quad (15)$$

Siendo T el valor umbral previamente decidido. Este valor depende de la aplicación que se está realizando. Para evitar que la máscara detecte píxeles que forman un borde, aplicamos el siguiente filtro no lineal:

$$R(i,j) = \min(|f(r,s) - f(i,j)|) \quad (16)$$

Es por esto por lo que diremos que un píxel (i,j) es un punto aislado siempre que:

$$|R(i,j)| > T \quad (17)$$

Para que las técnicas de segmentación basadas en los bordes sean adecuadas, las regiones donde se aplican han de ser lo suficientemente homogéneas como para que la transición entre regiones pueda realizarse en base a los tonos de gris. De lo contrario deberíamos utilizar las técnicas basadas en regiones [28].

Cuando el nivel gris de un píxel difiere del nivel de los de su entorno, estamos ante un borde local, es decir, se presenta diferencia de contraste local. Esto es debido a dos razones [97]: que el píxel forma parte del borde de dos regiones distintas, donde cada región presenta homogeneidad en sus niveles de gris o que el píxel forma parte de un arco fino sobre un fondo con un distinto nivel de gris.

Para detectar los bordes es importante comenzar por los bordes locales. Éstos se detectan a partir de la tasa de cambio de los tonos de gris del entorno. Para ello se utiliza el operador gradiente o el *operador Laplaciano*.

$$\Delta^2 f(x,y) = \frac{\vartheta^2 f(x,y)}{\vartheta x^2} + \frac{\vartheta^2 f(x,y)}{\vartheta y^2} \qquad (18)$$

En la Figura 81 se muestra la comparación entre una imagen original y su correspondiente tras aplicar el operador Laplaciano [60].

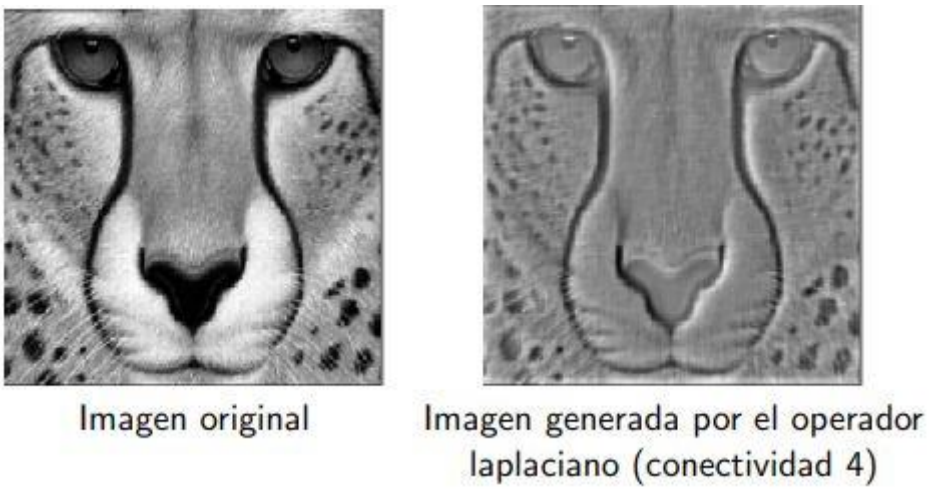


Figura 81. Imagen original vs Imagen generada por el operador Laplaciano [101]

2. Segmentación basada en la conectividad

Este proceso se basa en la teoría de que los puntos de una región han de estar conectados entre sí. Puede presentarse como una dificultad a la hora de proceder con la segmentación de imágenes, las oclusiones u ocultamientos parciales pueden impedir que los puntos de un mismo componente estén conectados entre sí [101].

Un conjunto de píxeles cumplirá la vecindad si entre ellos se da un criterio de similitud establecido. Cada conjunto de vecinos se etiqueta con un identificador diferente.

La conectividad puede darse de distintas formas: a cuatro, a ocho o a seis. Un píxel x_0 cuyas coordenadas son (x, y), tiene dos vecinos horizontales (x_1, x_3) y dos verticales (x_2, x_4) y sus coordenadas vienen dadas por:

$$(x+1, y), (x-1, y+1), (x, y+1), (x, y-1) \qquad (19)$$

Este conjunto de pixeles se denomina conectividad a cuatro, donde x_0 en (x,y) es el píxel central. Como conectividad ocho, respecto al píxel central *p* en (x, y), se conoce al conjunto que forman los píxeles de la conectividad cuatro junto con las cuatro diagonales.

En la Figura 82 se recogen, de forma generalizada, los pasos a seguir en el procesado de imágenes mediante Matlab los cuales se describen a continuación, estos avances se realizarán individualmente imagen por imagen, con el fin de obtener las áreas segmentadas, valores que se utilizarán como variables de entrada en la Lógica Difusa.

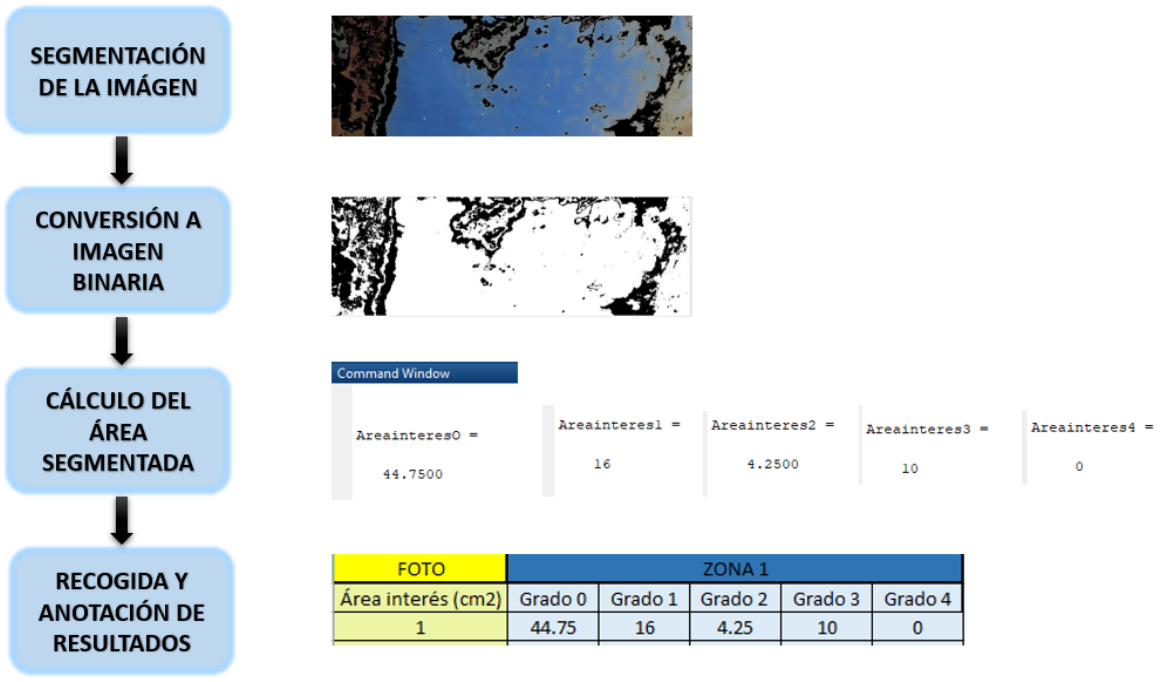


Figura 82. Etapas del procesado de imágenes con sus respectivos ejemplos (Elaboración propia)

Para comenzar, se busca identificar los distintos grados de corrosión presentes en cada imagen. Para este primer paso se emplea la aplicación *Color Threesholder*, que nos mostrará una representación gráfica de la cantidad de píxeles que hay en cada tonalidad de color de la imagen.

En la Figura 83 se presenta la interfaz que nos muestra Matlab; estos espacios de color que nos proporciona el programa son los que se han explicado previamente, siendo el modelo seleccionado para trabajar el HSV.

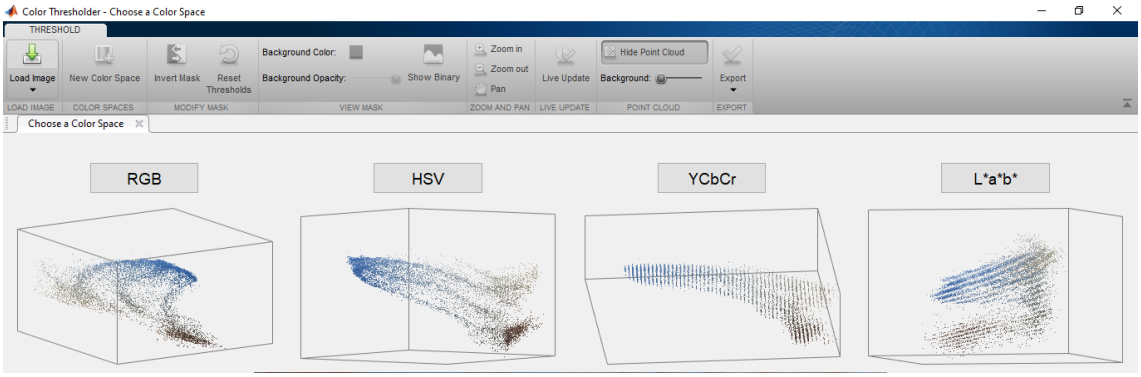


Figura 83. Espacios de color en el entorno de Matlab (Elaboración propia)

Tras elegir el espacio HSV se abre una interfaz donde se muestra la imagen junto con el color de los controles de los componentes para dicho espacio. En la Figura 84 se muestra la interfaz de trabajo para el espacio HSV seleccionado donde H significa matriz, S saturación y V valor, estos serán los controles que se irán variando para obtener las distintas zonas buscadas. La componente H se maneja mediante un mando de doble dirección, mientras que la S y la V lo hacen a partir de dos deslizadores histograma.

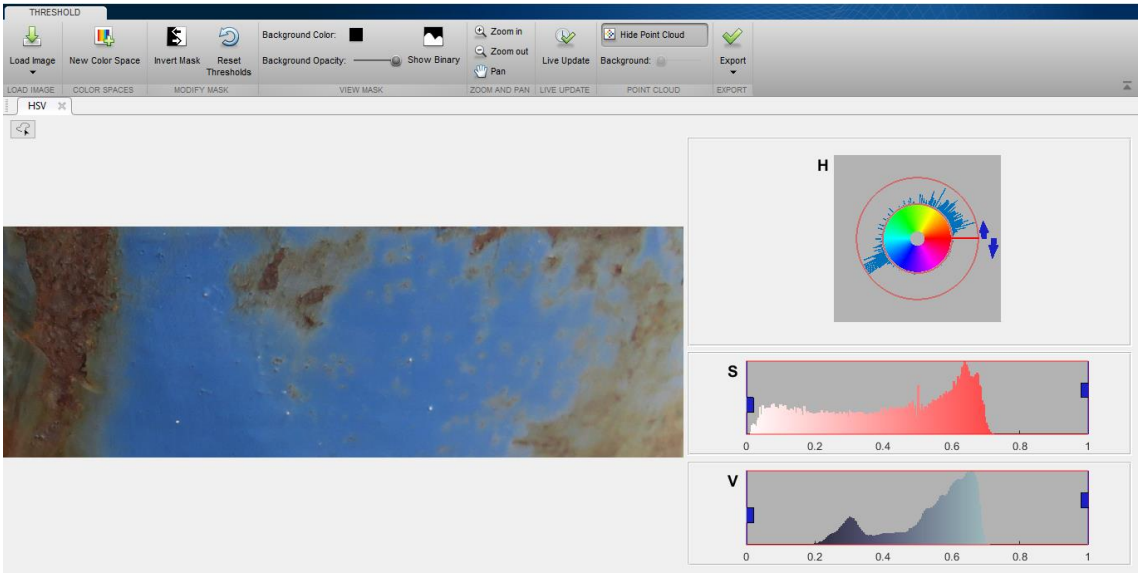


Figura 84. Espacio HSV, aplicación Color Thresholder Matlab (Elaboración propia)

La imagen será segmentada de manera interactiva, mediante la utilización de los controles iremos viendo la segmentación en curso. Se puede comprobar que las tres variables del espacio HSV captan todas las tonalidades de color.

En segundo lugar, se seleccionan las zonas de la imagen donde observamos presencia de corrosión. Dichas zonas se caracterizan por su tonalidad más oscura, en colores marrones y se acotan mediante los controles interactivos que proporciona la aplicación.

El área ocupada por grietas y picaduras se distingue fácilmente por ser más oscuro que el resto, y por las formas en las que se presenta. En *Color Thresholder* identificamos estas áreas con matices comprendidos entre el rosa y el rojo, estando habitualmente sus valores de saturación por encima de 0,3.

A lo largo del desarrollo del presente Proyecto hemos podido comprobar cómo, el área ocupada por grietas y picaduras tiende a ser menor que aquel donde la corrosión es incipiente. Podemos confirmarlo gracias a la variación de los controles del mando H pues, llegado un punto, se observa un salto en dicho histograma, correspondiente al límite entre área de corrosión incipiente y área de grietas y picaduras. La presencia de corrosión incipiente se distingue por los distintos tonos marrones que aparecen; el color no es tan oscuro como en las grietas y en las zonas donde la corrosión provoca la rotura del material.

En la Figura 85 se muestra la interfaz de Matlab donde buscamos identificar correctamente el área ocupado por grietas y picaduras de un tramo de barandilla.

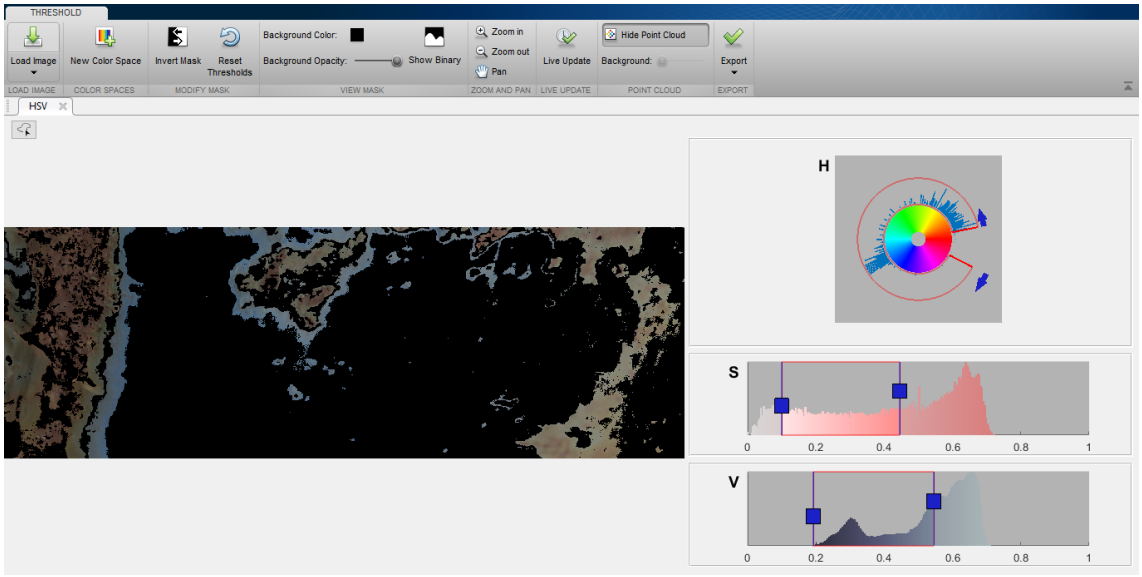


Figura 85. Segmentación de la corrosión, aplicación *Color Thresholder* Matlab (Elaboración propia)

Una vez identificada la corrosión, "jugando" con los niveles de H, S y V, el siguiente paso consiste en invertir la imagen, mediante el comando *Invert Mask* buscamos la imagen complementaria, ahora es la zona ocupada por el fenómeno de corrosión la que aparecerá en color negro. En la Figura 86 se muestra la imagen invertida para facilitar la comprensión.

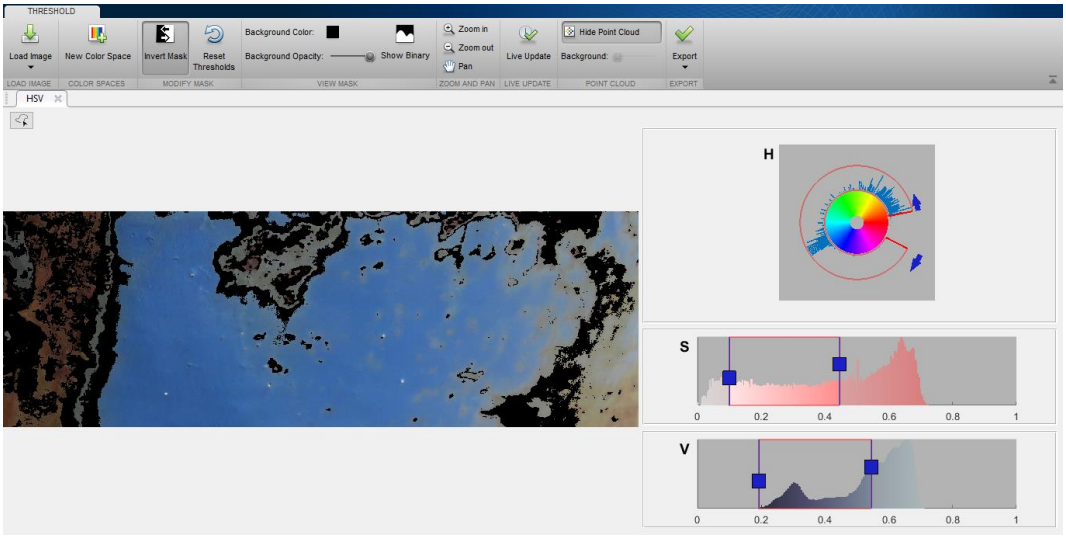


Figura 86. Inversión de la imagen (Elaboración propia)

Por último, se transforma la imagen de la Figura 84 en una imagen binaria, mediante el comando *Show Binary*; en ella aparecen todos los puntos donde existe corrosión en color negro, mientras que, el resto de la imagen está en color blanco. Las imágenes binarias en Matlab son *arrays* de ceros y unos de clase *logical* (lógica o binaria). No se pueden considerar imágenes binarias los *arrays* [102] que no son de clase lógica [93].

En la Figura 87 se presenta la imagen binaria. Se pueden apreciar en la parte superior de la imagen, los comandos que hemos ido aplicando hasta llegar a este punto.

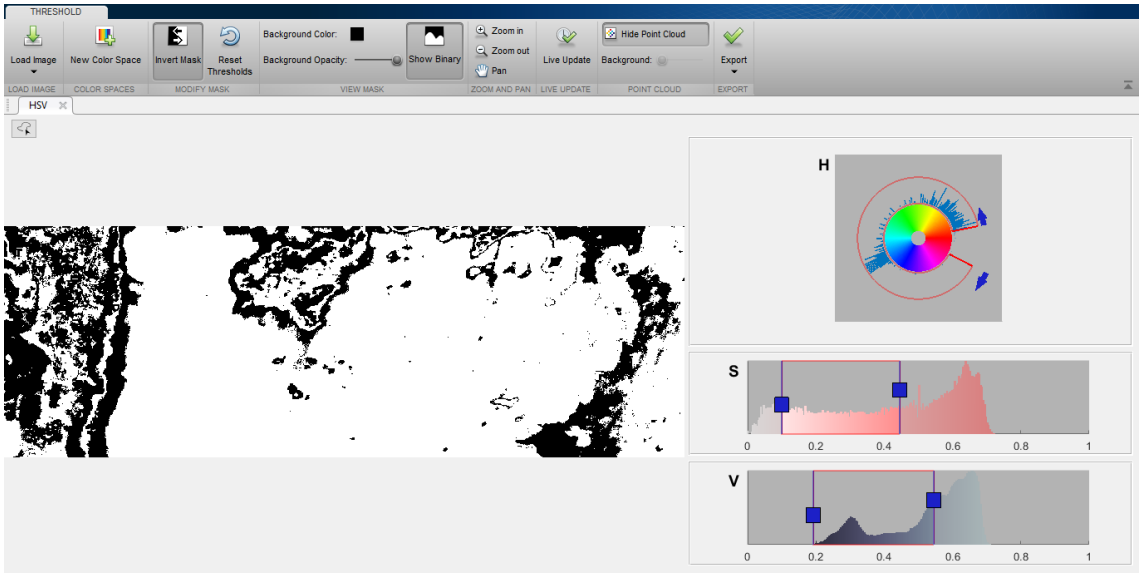


Figura 87. Imagen binaria (Elaboración propia)

Tras obtener la imagen binaria, hemos finalizado el trabajo con la aplicación *Color Thresholder*. Una vez realizado este paso, la siguiente tarea es la de implementar un código

de medida para distinguir los distintos grados de corrosión, esto se presenta en el apartado 3.5.5.

3.5.5.- Código de medida del grado de corrosión

El código de medida utilizado en el presente Trabajo es similar al empleado por J.Cantero en su Proyecto Fin de Máster [73]. Para llegar a este punto es necesario que todas las imágenes hayan sido procesadas con *Color Thresholder* en Matlab, siguiendo los pasos descritos en el apartado anterior. Como figura "patrón" de referencia se ha utilizado la Figura 88.

Figura 88. Imagen utilizada como ejemplo, dimensiones 150x50 mm (Elaboración propia)

Partiendo de esta imagen, se obtienen las tres correspondientes a las Figuras 85, 86 y 87. A partir de ellas, se procede a analizar la corrosión presente en la imagen original, estas dos imágenes facilitan este trabajo pues aíslan la corrosión según sus tonalidades de color.

El código de medida creado para el correcto desarrollo de este trabajo cuenta con cinco grados de corrosión; cuantos más grados se asignen, mayor será la precisión a la hora de clasificar los distintos puntos tomados en cada una de las imágenes procesadas. En todo momento la clasificación se basa en el análisis visual de dichos puntos.

En la Figura 89 se presentan, por orden de menor a mayor importancia en cuanto a gravedad por corrosión se refiere, los cinco grados de corrosión o niveles con los que se ha trabajado.

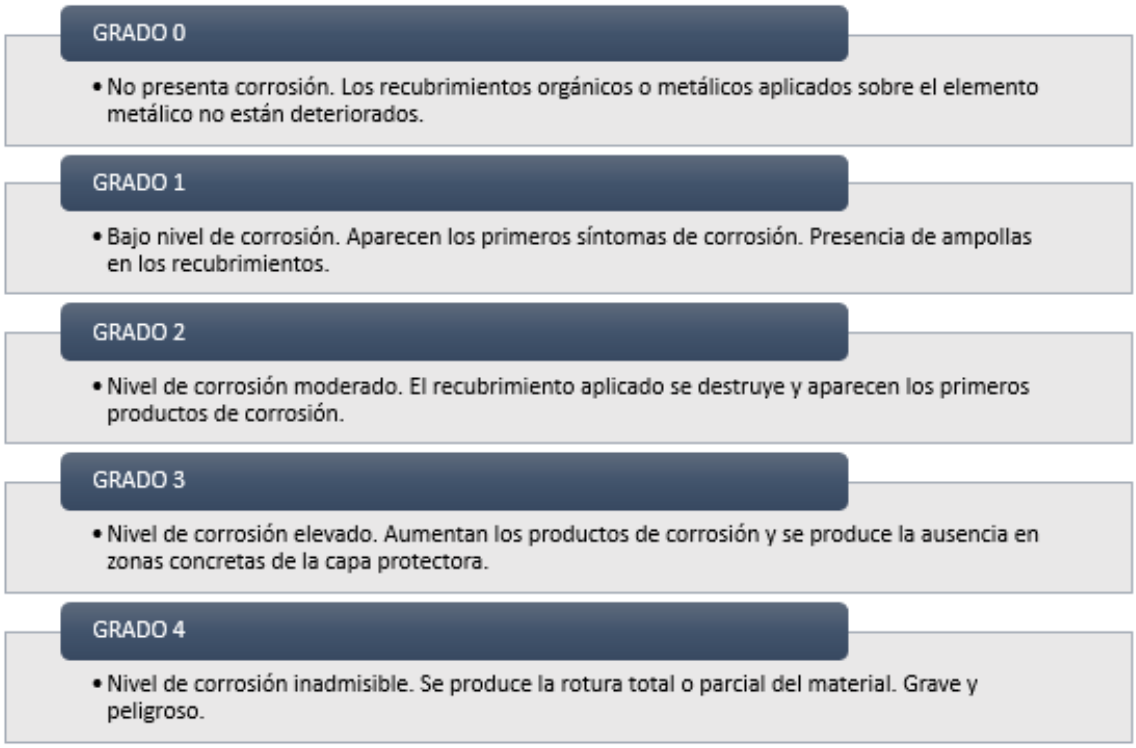


Figura 89. Clasificación grados de corrosión para el presente Trabajo Fin de Máster (Elaboración propia)

La corrosión no siempre se puede apreciar visualmente, y es por esto por lo que debemos prestar especial atención en las estructuras, como puede ser la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero. Cuando el recubrimiento que protege el elemento metálico pierde su efecto barrero, bien porque éste se desprenda debido a un inadecuado espesor para la atmósfera marina agresiva en la que se encuentra, o porque se hayan formado productos de corrosión en el substrato, aparecen importantes debilidades. En la Figura 90 se muestra un tramo de la barandilla objeto de estudio, concretamente de la Zona Crítica 1, a la altura del Parque de Mesones, donde se puede ver en la pintura de la barandilla burbujas, ya explotadas, que dejan al aire lo que parece ser un galvanizado previo, posiblemente aplicado hace muchos años.

Figura 90. Aparición del galvanizado (Elaboración propia)

En la Figura 91 se presenta una imagen tomada en la Zona Crítica 2, donde la presencia de ampollamientos se observa con facilidad. Esto se debe a la aplicación continua, sin mantenimiento previo, de recubrimientos, en este caso pintura de color azul Hempaquick Enamel 53840 [87]. Cabe destacar un hecho muy importante, y que en mayor o menor medida ha marcado el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster: como se venía diciendo, la barandilla de esta zona ha sido pintada durante el mes de Mayo, es por esto por lo que quizá no se aprecien tantos tramos con tonalidades marrones debidas a la corrosión, pero lo que sí se puede ver claramente en todos ellos es la presencia de ampollas y desperfectos, que dejan claro el estado de alto nivel de corrosión en el que se encuentra la barandilla.

Figura 91. Presencia de burbujas y ampollas en la barandilla, Zona crítica 2 (Elaboración propia)

Las imágenes con las que se ha trabajado han de clasificarse según su grado de corrosión, mediante el código de medida diseñado. Es necesaria la aplicación de un mallado a cada imagen; con ello, se dan los distintos valores en cuanto al grado de corrosión que presentan cada uno de los puntos delimitados por dicho mallado. La geometría de las imágenes una vez han sido preparadas, como se había mencionado, sigue la relación L=3h, siendo L la base y h la altura. Se ha elegido una medida común de 15 cm x 5 cm, por lo que, el mallado obtenido, cuenta con 30 columnas y 10 filas, haciendo así de cada casilla un cuadrado de 5 cm^2. En total se dispone de 300 puntos por imagen.

En la Figura 92 se muestra la imagen utilizada como guía, presente en las Figuras 85, 86 y 87, tras haber aplicado el mallado. Como ejemplo se presentan la imagen original y la imagen binaria. Este proceso es necesario aplicarlo a todas las imágenes con las que trabajamos en Matlab.

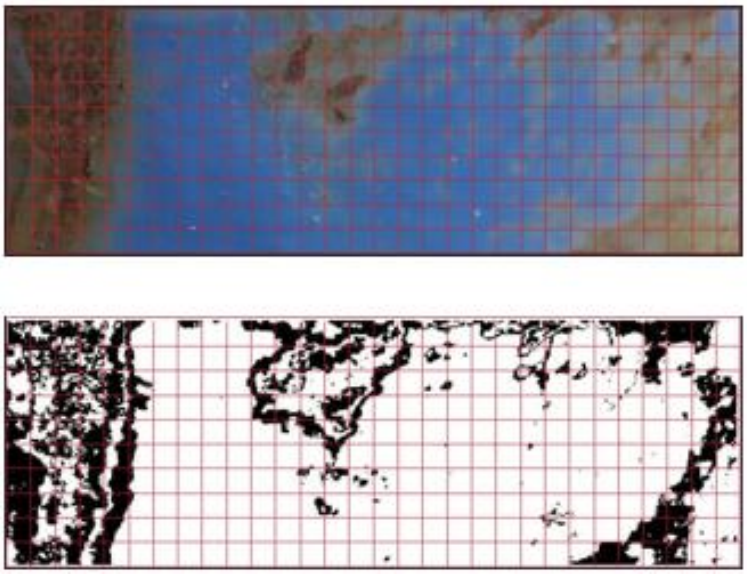


Figura 92. Mallado de las imágenes mediante Autocad (Elaboración propia)

Tras aplicar el mallado, el siguiente paso, es dar valor a cada punto de los que conforman dicha rejilla, en función del grado de corrosión que presentan. Para el análisis de cada punto se utiliza la imagen que mejor muestra la corrosión presente.

En la Figura 93 se muestra la matriz obtenida tras aplicar cada uno de estos pasos a la imagen guía, Figura 88, y asignar a todos los puntos de la misma el grado de corrosión que les pertenece, del 0 al 4, en función de los descritos en la Figura 87 (grados de corrosión elegidos para el presente trabajo).

3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2	2	1	1	1	1	2	3	3	2	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
3	3	3	3	2	0	0	0	0	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
3	3	3	3	2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	2	1	1

Figura 93. Matriz determinante de la corrosión en la imagen guía de la Figura 92 (Elaboración propia)

3.5.6.- Modelización de las imágenes con Matlab

Tras obtener todas las matrices del grado de corrosión, el paso que lo sigue es el de modelizar cada una de las imágenes mediante Matlab; para ello se ha de utilizar el comando *surf* [103], que permite crear un gráfico de superficie tridimensional.

Para el presente Proyecto utilizamos dicho comando *surf* con el fin de obtener la superficie interpolada en 2D mediante un mapa de color *jet*. Matlab nos proporcionara una imagen en la que los colores variarán en función del grado de corrosión en cada punto. A modo de ejemplo, los tonos azules se corresponden con los grados de corrosión más bajos, y las tonalidades granates representan el grado más elevado.

En la Figura 94 se muestra el modelado mediante Matlab de la imagen de la Figura 92, es decir, la fotografía que venimos tomando como ejemplo durante todo el desarrollo.

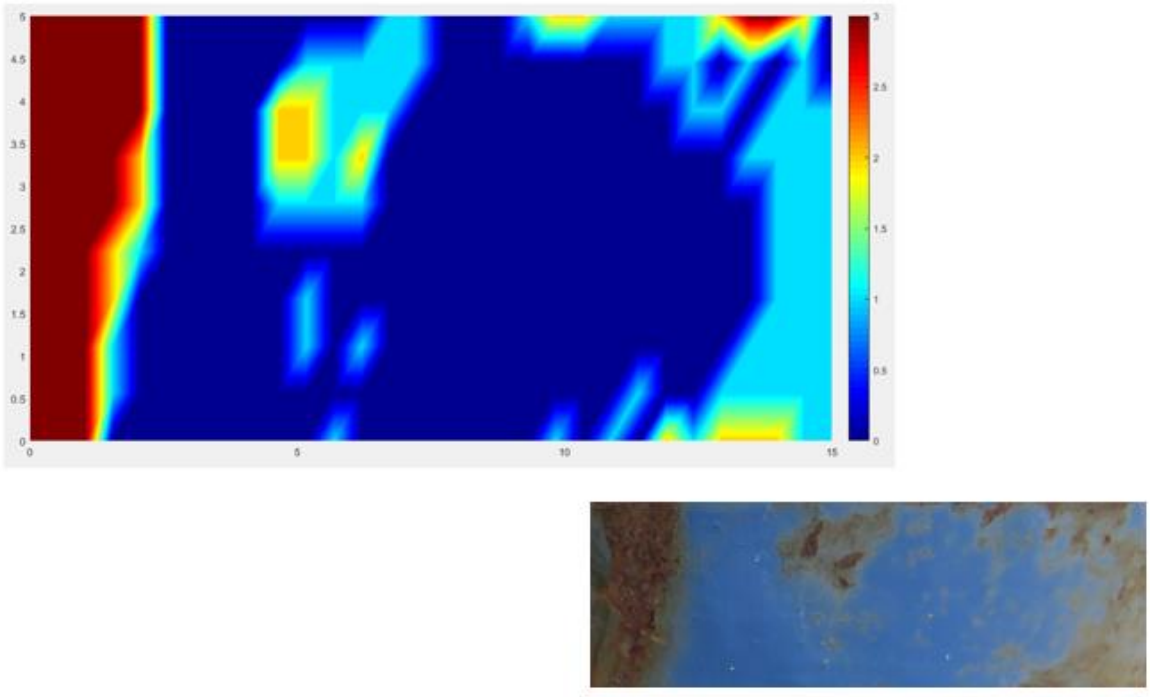


Figura 94. Modelización mediante Matlab de la imagen guía (Elaboración propia)

A modo de ejemplo visual, en la Figura 95, margen izquierdo, se muestra la Imagen 1, correspondiente con la Figura 91, junto con su modelización, y en el margen derecho, la Imagen 2, también acompañada de su modelado. Todas las imágenes analizadas se recogen en el ANEXO III.

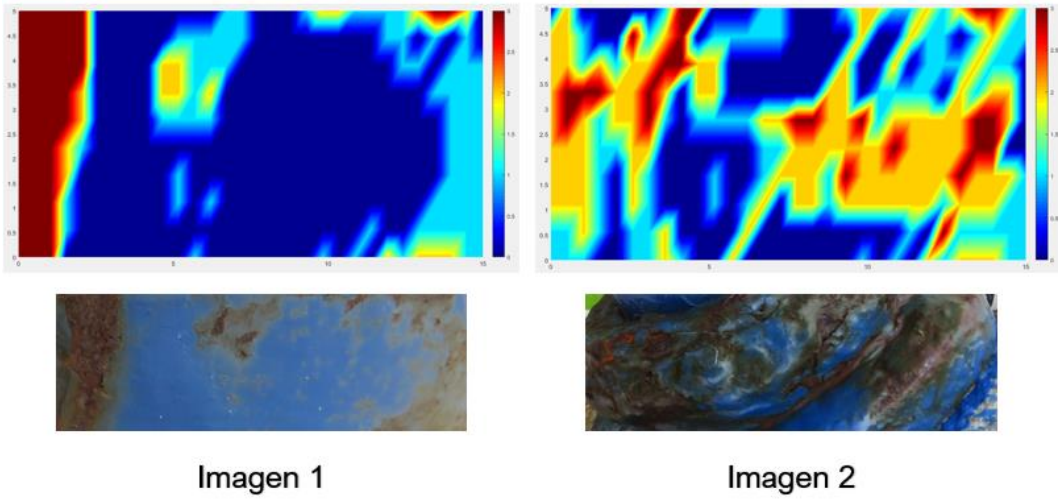


Figura 95. Ejemplo de modelización 3D entre dos imágenes diferentes (Elaboración propia)

3.5.7.- Cálculo de áreas

Una vez completados todos los pasos descritos en los apartados anteriores, de segmentación y procesado de imágenes, se procede a calcular las distintas áreas de trabajo necesarias.

En la Figura 96 se muestra el código generado en Matlab con las correspondientes ecuaciones necesarias. En primer lugar, leemos la matriz generada para la imagen con la que se está trabajando, a continuación, calculamos los números de 0,1,2,3 y 4 que contiene dicha matriz, recordando que estos números representan los distintos grados de corrosión. Una vez obtenidos estos datos, se calcula el valor medio de corrosión a partir del mapeo de colores que nos ofrece el comando surf. Por último, calculamos el área de cada cuadro del mallado y el área de interés.

Matriz1.m | Matriz3.m | Matriz4.m | Matriz5.m

```
Z=xlsread('Matrices.xlsx', 'A1:AD10')
X=[0:(15/29):15]';
Y=[5:(-5/9):0]';
surf(X,Y,Z)
shading interp
colormap jet
colorbar
view(2)

ceros=numel(Z(Z==0))
unos=numel(Z(Z==1))
dos=numel(Z(Z==2))
tres=numel(Z(Z==3))
cuatros=numel(Z(Z==4))

S=sum(mean(Z))/30

areafoto=15*5
filas=10
columnas=30
Areapixel=areafoto/(filas*columnas)
Areainteres=unos*Areapixel
```

Figura 96. Área de trabajo Matlab, código creado

El área de cada fotografía son 15cm x 5cm y se tiene un mallado y una matriz de 30 columnas por 10 filas. Las expresiones matemáticas utilizadas son las siguientes:

$$Área\ píxel = \frac{Área\ fotografía}{filas\ x\ columnas} \qquad (20)$$

Se denomina Área pixel al área de cada cuadrado de la malla.

$$\text{Área interés} = \frac{número\ de\ unos}{Área\ píxel} \qquad (21)$$

La ecuación (21) se aplica para los ceros, unos, doses, treses y cuatros.

Este procedimiento se emplea con todas y cada una de las imágenes tratadas, y los resultados obtenidos se anotarán en una hoja de cálculo de Excel como la que se muestra en la Tabla 15. Posteriormente, se analizan los datos obtenidos y se utilizan para aplicar el Método *Fuzzy* al presente Proyecto Fin de Máster.

Tabla 15. Hoja de datos para la obtención de las variables a analizar mediante el método *Fuzzy*

FOTO	ZONA 1				
Área interés (cm2)	**Grado 0**	**Grado 1**	**Grado 2**	**Grado 3**	**Grado 4**
1	44.75	16	4.25	10	0
2	23.25	19.75	25.75	6.25	0
3	47.5	14.25	13.25	0	0
4	42.75	16.25	16	0	0
5	5.5	11	57.75	0.75	0
6	61	41	0	0	0
7	51.5	15.5	6.5	1.5	0
8	67	6.5	1.5	0	0
9	58.75	2.5	12.75	1	0

Se harán los cálculos procedentes para obtener las áreas correspondientes a cada zona, y a continuación se recogerán las variables que formarán parte de los valores de entrada para la aplicación del Método *Fuzzy*.

3.6.- Método *Fuzzy* aplicado al presente Proyecto

3.6.1.- Conjuntos de entrada

Tras analizar todas las imágenes recogidas para las diferentes zonas de la Segunda Playa del Sardinero (Zona 1, Zona 2 y Zona 3), las variables de entrada seleccionadas, correspondientes a los grados de corrosión estudiados, son las siguientes:

- Área libre de corrosión (Grado 0)
- Área de corrosión incipiente (Grado 1)
- Área ocupada por grietas y picaduras

- Área mayormente afectada por la corrosión (Corrosión > 70% de la superficie)
- Área totalmente corroída

3.6.2.- Conjuntos de salida

Los grados de corrosión obtenidos serán CA (Grado 0), CB (Grado 1), CC (Grado 2), CD (Grado 3) y CE (Grado 4), donde se lograrán valores que oscilan entre el 0% correspondiente a un grado de corrosión muy bajo o nulo y el 100%, correspondiente a una estructura totalmente corroída.

3.6.3.- Etapas del proceso

En este apartado se seguirán los pasos teóricos descritos en el Capítulo 2:

A) FUZZYFICACIÓN

El primer paso para proceder al análisis mediante *Fuzzy* trata de convertir las áreas totales, denominadas entradas abruptas, en entradas tipo *Fuzzy*. Para ello se determinan las funciones de pertenencia de cada una de las variables a partir de la asignación de etiquetas dentro del Universo de Discurso.

Variables de entrada

- Área libre de corrosión
    - Muy pequeña (MP)
    - Pequeña (P)
    - Media (M)
    - Grande (G)
    - Muy grande (MG)

- Área de corrosión incipiente
    - Muy pequeña (MP)
    - Pequeña (P)
    - Media (M)
    - Grande (G)
    - Muy grande (MG)

- Área ocupada por grietas y picaduras
    - Muy pequeña (MP)
    - Pequeña (P)
    - Media (M)
    - Grande (G)
    - Muy grande (MG)

- Área mayormente afectada por la corrosión (Corrosión > 70% de la superficie)
    - Muy pequeña (MP)
    - Pequeña (P)
    - Media (M)
    - Grande (G)
    - Muy grande (MG)

- Área totalmente corroída
    - Muy pequeña (MP)
    - Pequeña (P)
    - Media (M)
    - Grande (G)
    - Muy grande (MG)

Variables de salida

- Grado de corrosión
    - Muy bajo (MB)
    - Bajo (B)
    - Medio (M)
    - Alto (A)
    - Muy alto (MA)

En la Figura 97 se presentan las variables recogidas en la etapa de *Fuzzyficación* de manera esquemática, facilitando así su comprensión.

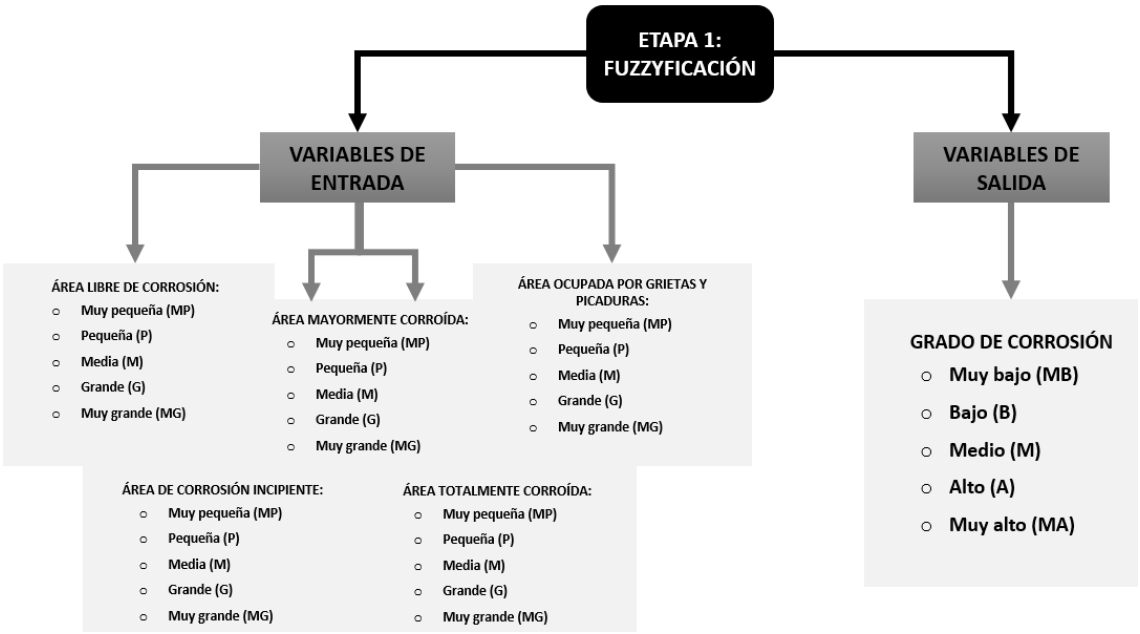


Figura 97. Variables de entrada y salida de la etapa de Método *Fuzzy* (Elaboración propia)

Estas funciones se verán representadas en gráficas, las cuales facilitarán la transformación de los términos lingüísticos en entradas *Fuzzy*.

Cabe recordar, antes de pasar a trabajar con los datos obtenidos del análisis fotográfico de imágenes, la definición de función de pertenencia de un conjunto, FP; éste es el grado en que cada elemento de un universo dado pertenece a dicho conjunto. A modo de ejemplo, si la probabilidad de que un elemento pertenezca a cierto conjunto es 0,5 y afirmamos que el elemento pertenece al conjunto, la probabilidad de acierto será del 50%, pero el elemento en concreto puede pertenecer o no al conjunto.

Siendo el objetivo de este Proyecto Fin de Máster el análisis de la corrosión entre las tres zonas de estudio seleccionadas, se establece el siguiente criterio para trabajar con las funciones de pertenencia asignadas a cada etiqueta: se seleccionarán los valores críticos, máximo y mínimo de cada área en las distintas zonas (área máxima corroída en la Zona 1, área mínima corroída en la zona 1, así para todas ellas), mientras que, para el resto de los valores, se utilizará la estadística mediante la Distribución Normal de los datos obtenidos.

A continuación, se muestra, a modo de ejemplo, el análisis de las variables de entrada para este primer paso del proceso denominado *Fuzzyficación*, con los valores máximos y mínimos del total de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero. A modo de

recordatorio, todas estas imágenes se encuentran recogidas en el Anexo III, Procesado de imágenes y se nombran, por ejemplo, como Imagen 1.24 (Zona 1, Fotografía 24).

Variable área totalmente corroída

El área máxima totalmente corroída corresponde a la Imagen 18 de la Zona 3, con un área total absolutamente dañado de 75 cm^2. Como las variables a introducir en el método difuso son el promedio de cada zona, hemos de multiplicar esta área por el número de fotografías analizadas por zona, por lo que, la FP de la etiqueta *muy grande* tiene un valor igual a uno a partir del área siguiente:

$$75 \text{ x } 30 = 2250 \text{ cm}^2 \quad (22)$$

Por otro lado, el valor mínimo es de 0,75 cm^2 correspondiente a la Imagen 1 de la Zona 3, así es que la FP de la etiqueta *muy pequeña* vale uno hasta la siguiente área:

$$1 \text{ x } 30 = 30 \text{ cm}^2 \quad (23)$$

En las Figuras 98 y 99 se muestran las fotografías correspondientes al área máxima libre de corrosión (Imagen 3.18) y al área mínima (Imagen 2.5).

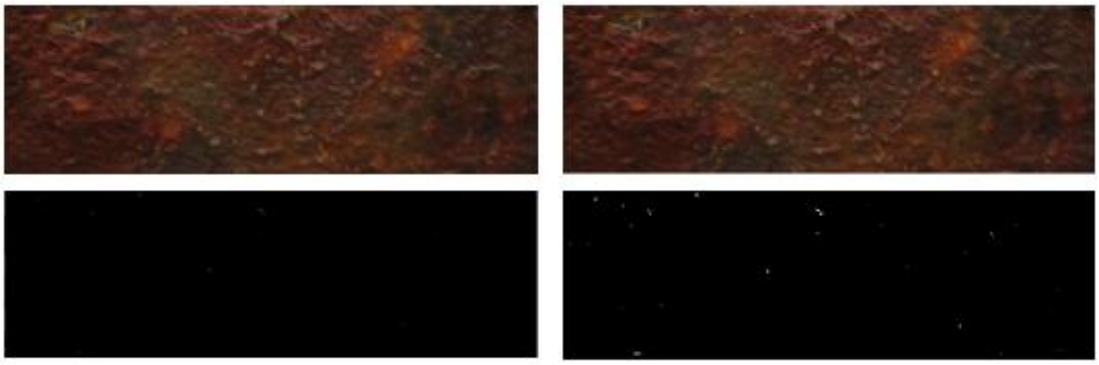


Figura 98. Área máxima totalmente corroída, correspondiente a la Imagen 3.18 del Anexo III (Elaboración propia)

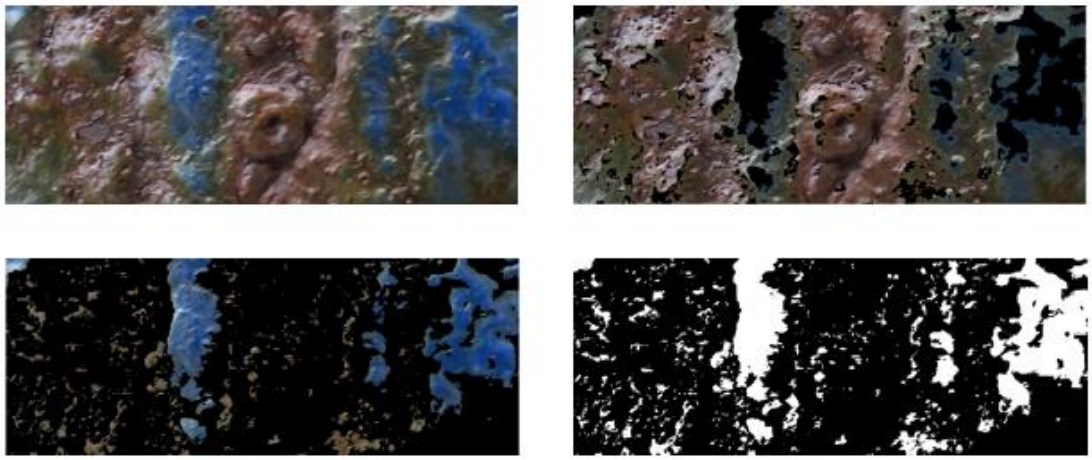


Figura 99. Área mínima totalmente corroída, correspondiente a la Imagen 3.1 del Anexo III (Elaboración propia)

Variable área mayormente afectada por la corrosión

En la Imagen 5 de la Zona 3 se puede observar el área máxima mayormente afectada por la corrosión, siendo de 69 cm^2; por ello la Función de Pertenencia de la etiqueta *muy grande* tiene un valor igual a uno a partir del área:

$$69x\ 30 = 2070\ cm^2 \quad (24)$$

Mientras tanto, el valor mínimo pertenece a la Imagen 17 de la Zona 3, para un valor de 0,5 cm^2, por lo que la etiqueta *muy pequeña* tiene valor 1 hasta la siguiente área:

$$0{,}5\ x\ 30 = 15\ cm^2 \quad (25)$$

En las Figuras 100 y 101 se presentan las fotografías correspondientes a los valores máximo y mínimo de la variable área mayormente afectado por la corrosión.

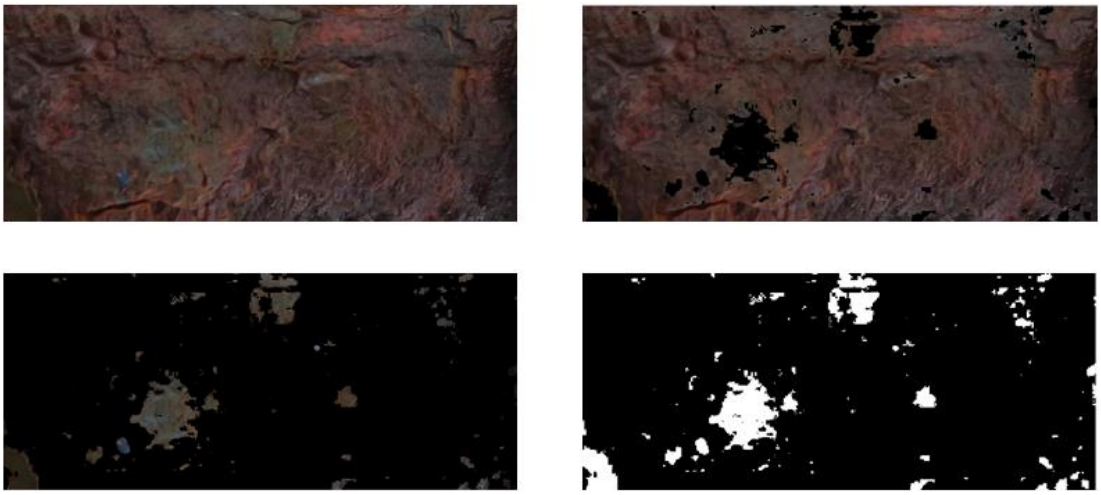


Figura 100. Área máxima mayormente afectada por la corrosión, correspondiente a la Imagen 2.5 del Anexo III (Elaboración propia)

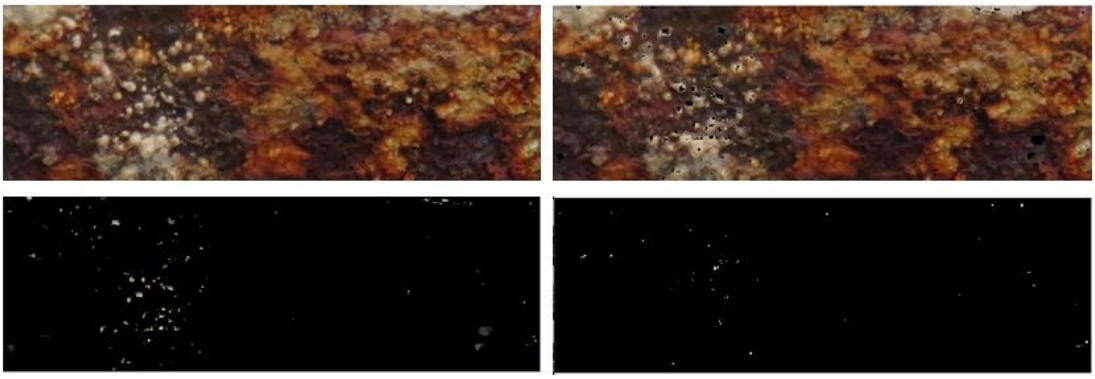


Figura 101. Área mínima mayormente afectada por la corrosión, correspondiente a la Imagen 3.17 del Anexo III (Elaboración propia)

Variable área ocupada por grietas y picaduras

El área máxima ocupada por grietas y picaduras corresponde a la Imagen 19 de la Zona 3, con un área total de 61,75 cm^2. Multiplicando esta superficie por el número de imágenes estudiadas en la Zona 3, nos resulta la expresión (26):

$$\text{Área de la etiqueta MG para la FP1} = \text{Área max. ocupado por grietas y picaduras x 30 imágenes} \quad (26)$$

El grado de pertenencia de la función de pertenencia (FP), correspondiente a la etiqueta *muy grande* (MG) de la variable *Área ocupada por grietas y picaduras* para la Zona 3, tendrá entonces un valor 1 de 1.852,5 cm^2.

Como valor opuesto extremo se toma la etiqueta *muy pequeña* (MP); esta área es la de la Imagen 23 de la Zona 1, por lo tanto, el Área mínima ocupado por grietas y picaduras es de 0,5 cm^2. Al igual que para la etiqueta MG, tenemos:

$$\text{Área de la etiqueta MP para la FP1} = \text{Área min. ocupada por grietas y picaduras x 30 imágenes} \quad (27)$$

Es decir, 15 cm^2.

A continuación, se muestran, en las Figura 102 y 1013, estas dos fotografías, la correspondiente al área máxima y al área mínima ocupada por grietas y picaduras.

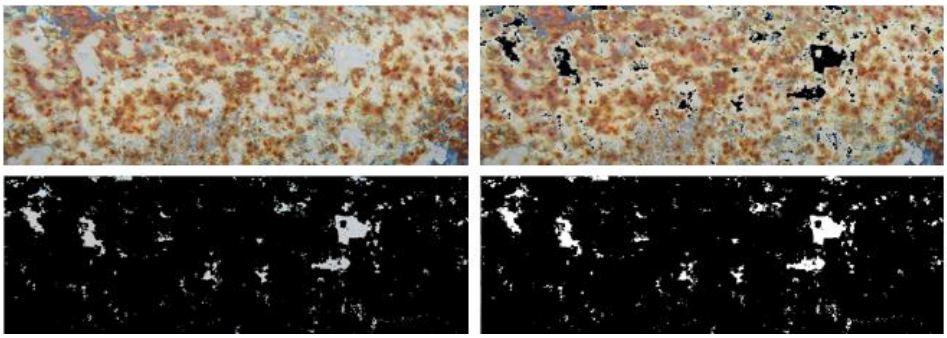


Figura 102. Área máxima ocupada por grietas y picaduras, correspondiente a la Imagen 3.19 del Anexo III (Elaboración propia)

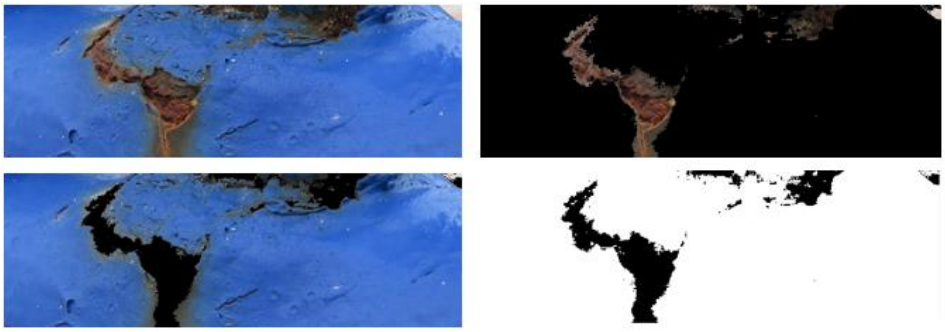


Figura 103. Área mínima ocupada por grietas y picaduras, correspondiente a la Imagen 1.23 del Anexo III (Elaboración propia)

Variable área de corrosión incipiente

De los resultados obtenidos a partir del análisis fotográfico se observa que, el valor máximo del área de corrosión incipiente corresponde a la Imagen 20 de la Zona 2, cuyo valor es igual a 75 cm^2. Por lo tanto, el valor a partir del cual la etiqueta correspondiente a *muy grande* (MG) concierne a un grado de pertenencia uno es:

$$75 \text{ x } 30 = 2250 \text{ cm}^2 \quad (28)$$

Por otro lado, el valor mínimo del área de corrosión incipiente se parecía en la Imagen 3 de la Zona 2, dicho valor es igual a 1 cm^2. Dado ello, el valor de la etiqueta *muy pequeño* (MP) adquiere un grado de pertenencia igual a uno hasta una superficie de:

$$1 \text{ x } 30 = 30 \text{ cm}^2 \quad (29)$$

En las Figura 102 y 103 se muestran las imágenes correspondientes al valor máximo (Imagen 2.20) y mínimo (Imagen 2.3) del área de corrosión incipiente.

Figura 104. Área máxima de corrosión incipiente correspondiente a la Imagen 2.20 del Anexo III (Elaboración propia),

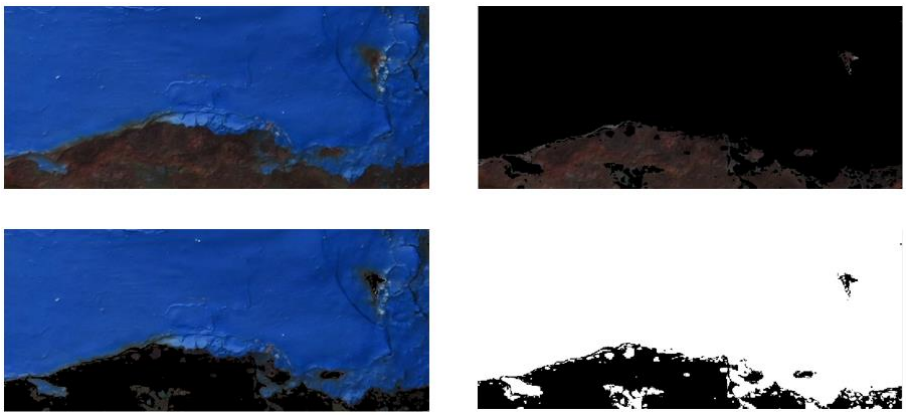


Figura 105. Área mínima de corrosión incipiente correspondiente a la Imagen 2.30 del Anexo III (Elaboración propia),

Variable área libre de corrosión

A partir de los datos obtenidos tras el análisis fotográfico podemos saber que el valor máximo del área libre de corrosión corresponde a la Imagen 25 de la Zona 1, este dato es de 75 cm^2, por lo tanto, la FP de la etiqueta *muy grande* tiene un valor igual a uno a partir del área siguiente:

$$75 \text{ x } 30 = 2250 \text{ cm}^2 \quad (30)$$

Por otro lado, el valor mínimo es de 1,25 cm^2 correspondiente a la Imagen 28 de la Zona 2, así es que la FP de la etiqueta *muy pequeña* cuenta con un valor igual a uno hasta la siguiente área:

$$1{,}25 \text{ x } 30 = 37{,}50 \text{ cm}^2 \quad (31)$$

En las Figuras 104 y 105 se muestran las fotografías correspondientes al área máxima libre de corrosión (Imagen 1.25) y al área mínima (Imagen 2.28).

Figura 106. Área máxima libre de corrosión, correspondiente a la Imagen 1.25 del Anexo III (Elaboración propia)

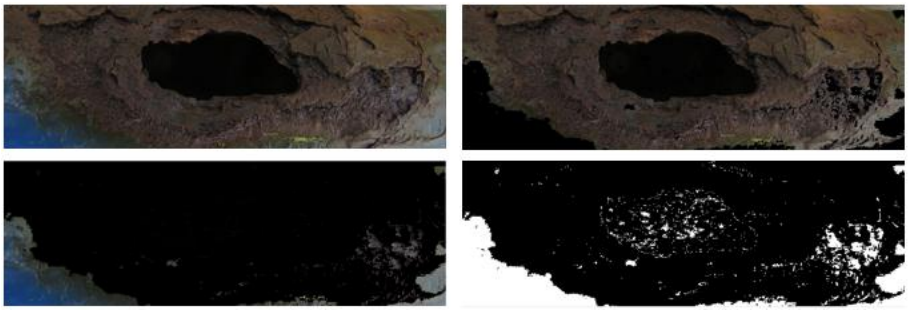


Figura 107. Área mínima libre de corrosión, correspondiente a la Imagen 2.28 del Anexo III (Elaboración propia)

Tras presentar los valores críticos para cada una de las variables, se expone, a modo de ejemplo, como se obtienen los valores de la etiqueta *media* para la variable Área Libre de Corrosión en la Zona 1.

Se utiliza la siguiente expresión, donde se involucran el valor promedio y la desviación:

$$Promedio - Desviación \leq Media \leq Promedio + Desviación \quad (32)$$

Estos datos han de multiplicarse por el número de fotografías analizadas para dicha zona, es decir, 30. Por lo que los resultados obtenidos, a partir de los datos calculados, son los que se presentan en la Figura 106.

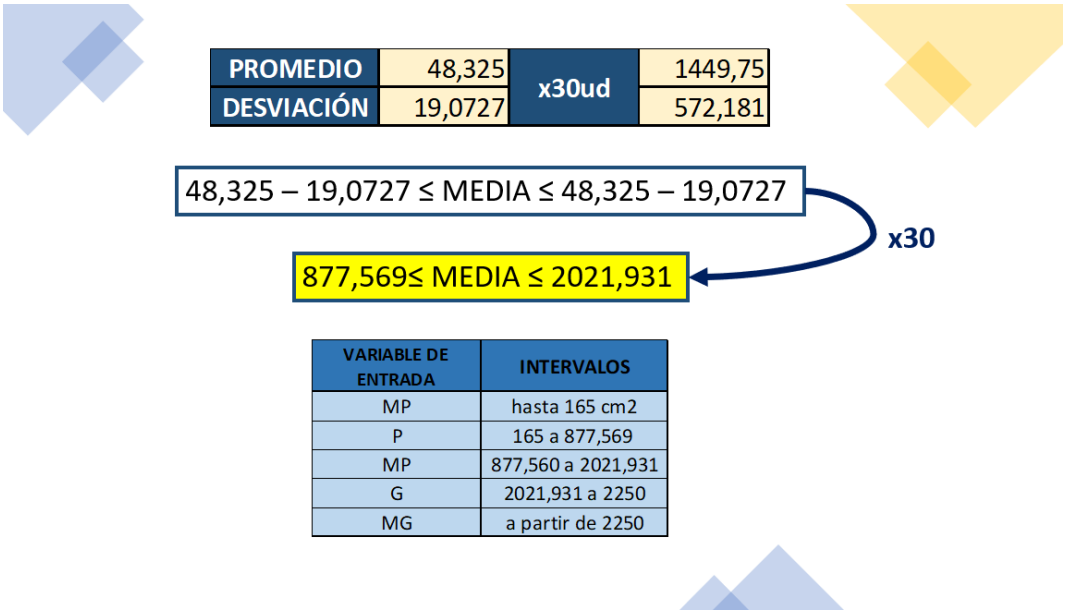


Figura 108. Ejemplo cálculo de intervalos para la variable Área de corrosión incipiente de la Zona 1 (Elaboración propia)

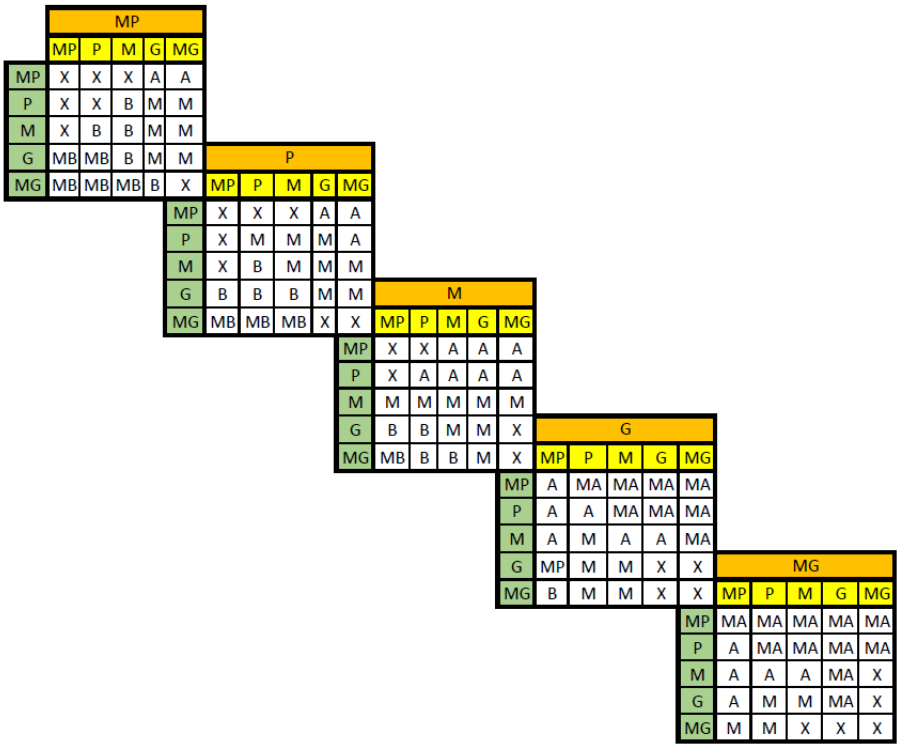
A continuación, se expone la segunda etapa del método difuso,

B) MOTOR DE INTERFERENCIA *FUZZY*

Esta fase consiste en construir el motor de interferencia *Fuzzy*, en el que aparecerán las 5 variables de entrada, área libre de corrosión, área de corrosión incipiente, área ocupada por grietas y picaduras, área mayormente afectada por la corrosión, área totalmente corroída. El objetivo de esta parte del proceso es el de convertir el conjunto difuso de entrada, en un conjunto difuso de salida, a partir de un proceso de deducción.

Para llevar a cabo esta fase, se han de introducir en una tabla, como la que se muestra en la Tabla 16, las distintas probabilidades de cada grado de corrosión, que permite relacionar así todas las variables mediante reglas Si-Entonces (*IF-THEN*). Dicho Motor de Interferencia o de Deducción nos ayudará a obtener la probabilidad de grado de corrosión a partir de la interferencia entre todas las variables. En el encabezado de cada una de las subtablas se coloca la variable de mayor peso.

Tabla 16. Motor de interferencia *Fuzzy* (Elaboración propia)



MP	MP	P	M	G	MG
MP	X	X	X	A	A
P	X	X	B	M	M
M	X	B	B	M	M
G	MB	MB	B	M	M
MG	MB	MB	MB	B	X

P	MP	P	M	G	MG
MP	X	X	X	A	A
P	X	M	M	M	A
M	X	B	M	M	M
G	B	B	B	M	M
MG	MB	MB	MB	X	X

M	MP	P	M	G	MG
MP	X	X	A	A	A
P	X	A	A	A	A
M	M	M	M	M	M
G	B	B	M	M	X
MG	MB	B	B	M	X

G	MP	P	M	G	MG
MP	A	MA	MA	MA	MA
P	A	A	MA	MA	MA
M	A	M	A	A	MA
G	MP	M	M	X	X
MG	B	M	M	X	X

MG	MP	P	M	G	MG
MP	MA	MA	MA	MA	MA
P	A	MA	MA	MA	MA
M	A	A	A	MA	X
G	A	M	M	MA	X
MG	M	M	X	X	X

A modo de recordatorio, las letras MA, A, M, B y MB se corresponden con las variables asociadas a la variable de salida, es decir, *grado de corrosión*. A su vez, la X representa aquellas zonas de ocurrencia cero.

En la Tabla 17 se muestra la que sería una sección del motor de interferencia a utilizar en dicho Trabajo, cuya variable de mayor peso es el Área totalmente corroída.

Una vez explicada la forma de calcular todos los datos relativos, tanto al análisis fotográfico, como a la aplicación del Método *Fuzzy* mediante Matlab, se van a exponer en el siguiente capítulo, los resultados obtenidos.

Tabla 17. Sección del motor de interferencia (Elaboración propia)

	ÁREA TOTALMENTE CORROÍDA				
	ÁREA MAYORMENTE AFECTADA				
ÁREA OCUPADA POR GRIETAS Y PICADURAS					

Todos estos procedimientos se presentarán, más detalladamente, en la siguiente sección, Capítulo 4: Resultados.

4. RESULTADOS

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos tras el correcto desarrollo del presente Proyecto, mediante el procesado de imágenes y la aplicación del método *Fuzzy* a cada una de las zonas planteadas, en la Segunda Playa del Sardinero.

En la Figura 109 se muestra esquematizado el procedimiento seguido para obtener los resultados requeridos: Grado de corrosión de cada Zona.

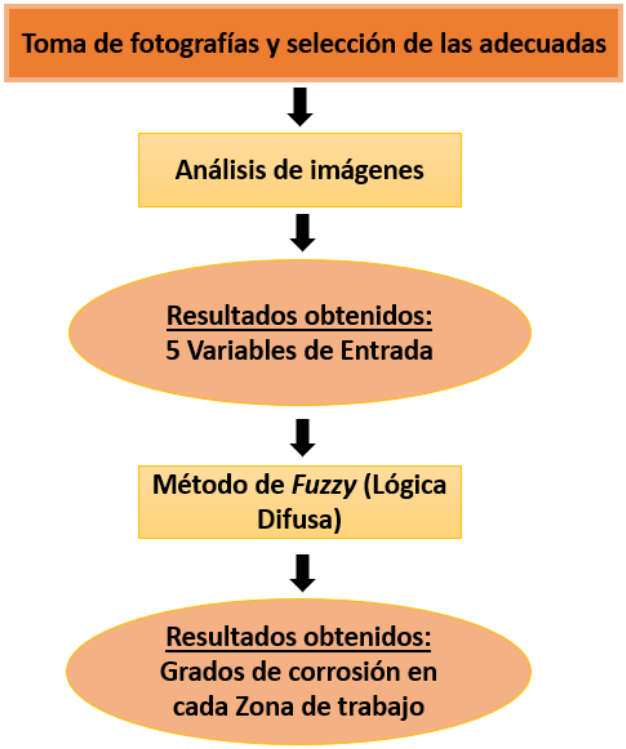


Figura 109. Pasos seguidos para llegar a los resultados finales, Grado de Corrosión en cada Zona de trabajo (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos paso a paso del seguimiento, atendiendo dicho esquema, se reflejan en el siguiente apartado.

4.1.- Resultados obtenidos del procesado de imágenes con Matlab

En este apartado se exponen los resultados obtenidos a partir de la segmentación de cada una de las imágenes, recogidas en el Anexo III, siguiendo los pasos descritos en el Capítulo 3. A partir de los datos obtenidos de Matlab para cada una de las imágenes analizadas, se han anotado los resultados clasificando las imágenes entre cada zona de

estudio. Dentro de cada zona se expondrán los resultados obtenidos en tablas, así como una serie de gráficos que nos ayudarán a comprender los mismos. Cabe destacar que las variables a valorar dentro de cada zona serán las mismas, tanto para la Zona 1, como para la 2 y la 3.

Variables: Área libre de corrosión
Área de corrosión incipiente
Área ocupada por grietas y picaduras
Área mayormente afectada por la corrosión
Área totalmente corroída

4.1.1.- Zona 1

En la Tabla 18 se muestra los datos de las variables recogidas en la Zona 1, tras análisis de un total de 30 imágenes; para cada una, se consideraron los valores correspondientes al grado de corrosión que experimentan, en función del estado de su superficie. En la penúltima fila se muestra la media de cada una de las variables pertenecientes a esta primera zona, mientras que en la última fila tenemos los valores correspondientes a la suma de dichas variables. Estos últimos datos serán los que utilicemos como entradas abruptas del proceso *Fuzzy*.

En la Figura 110 se representan los datos de Media y Suma de la Zona 1, de cuyos gráficos podemos llegar a la siguiente conclusión preliminar, que después se comparará con las otras zonas: En la zona 1 de estudio, correspondiente al segmento de la playa que coincide con el Parque Mesones, predominan las zonas de barandilla libres de corrosión, seguidas por tramos donde la corrosión es incipiente o, incluso en los que aparecen grietas y picaduras; hay que remarcar que son muy pocas las imágenes en las que encontramos signos de corrosión total.

Tabla 18. Datos obtenidos del análisis de imágenes en la Zona 1 (Elaboración propia)

FOTO	ZONA 1 / Área interés (cm²)				
Imágenes	**Grado 0**	**Grado 1**	**Grado 2**	**Grado 3**	**Grado 4**
1	44,75	16	4,25	10	0
2	23,25	19,75	25,75	6,25	0
3	47,5	14,25	13,25	0	0
4	42,75	16,25	16	0	0
5	5,5	11	57,75	0,75	0
6	61	41	0	0	0
7	51,5	15,5	6,5	1,5	0
8	67	6,5	1,5	0	0
9	58,75	2,5	12,75	1	0
10	37,5	26,5	8,75	2,25	0
11	12,5	4	51,25	7,25	0
12	68,25	6,75	0	0	0
13	58,5	1,25	7,5	7,75	0
14	43,25	0	0	23,75	8
15	68,75	2,25	4	0	0
16	61	14	0	0	0
17	13,25	0	2,75	51,25	7,75
18	35,5	0	0	1,55	38
19	49	0	0	21,5	4,5
20	35,5	0	0	1,5	38
21	16	0	11,75	24,25	23
22	62,75	3,25	0	3	6
23	64,25	0	0,5	6,75	3,5
24	61,75	13,25	0	0	0
25	75	0	0	0	0
26	64	0	0	0	11
27	64,75	10,25	0	0	0
28	36,75	8,25	16,5	13,5	0
29	55,25	19,75	0	0	0
30	64,25	0	3	2,25	5,5
MEDIA	**48,325**	**8,408**	**8,125**	**6,202**	**4,842**
SUMA	**1449,750**	**252,250**	**243,750**	**186,050**	**145,250**

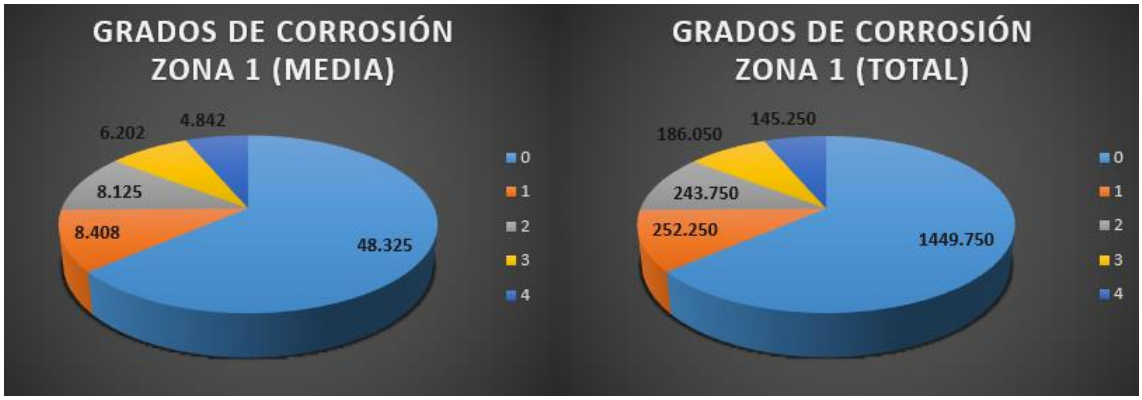


Figura 110. Grados de corrosión Zona 1 (Elaboración propia)

La dispersión de dichos datos se ve reflejada en la Figura 111, donde se ratifica que el grado libre de corrosión-color rojo-es el dominante.

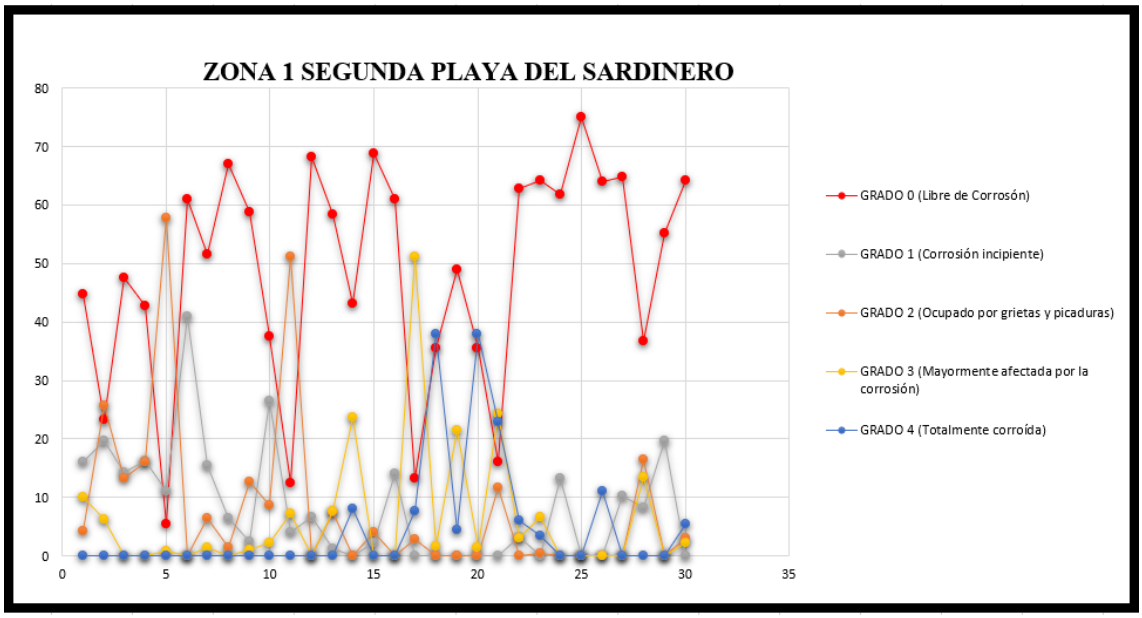


Figura 111. Dispersión de los distintos grados de corrosión en la Zona 1 (Elaboración propia)

En la Figura 112, se muestran dos fotografías representativas de esta primera zona de estudio. En la imagen de la izquierda, aparecen ampollas formadas por la separación de la capa protectora, junto con una zona de unión donde la corrosión presente es de grado importante. Por otro lado, en la imagen de la derecha, se muestra la presencia de tratamientos previos, aparentemente galvanizados, sobre los cuales se ha procedido a aplicar la pintura sin previo mantenimiento o estudio de prevención de la corrosión.

Figura 112. Fotografías tomadas en la Zona 2 (Elaboración propia)

4.1.2.- Zona 2

Al igual que en la Zona 1, para esta segunda Zona expresamos los resultados mediante una tabla de recogida de datos, acompañada de distintos gráficos que nos ayudarán a comprender los valores obtenidos en el análisis fotográfico.

En la Tabla 19 se muestran los valores obtenidos tras procesar la totalidad de las imágenes correspondientes a la Zona 2, correspondiente a la zona marcada entre la rotonda hasta el mirador del Hotel Chiqui. Como era de esperar, tras las diferentes inspecciones visuales realizadas a todo el espacio elegido para desarrollar este Trabajo de Fin de Máster, esta segunda zona destaca por la presencia más notable, respecto a la zona 1, de picaduras y grietas, así como por tener tramos prácticamente corroídos en toda su superficie.

Tabla 19. Datos obtenidos del análisis de imágenes en la Zona 2 (Elaboración propia)

FOTO	ZONA 2 / Área interés (cm^2)				
Imágenes	**Grado 0**	**Grado 1**	**Grado 2**	**Grado 3**	**Grado 4**
1	68.75	6.25	0	0	0
2	0	0	13	59	3
3	50.5	1	2.5	21	0
4	44.25	9.75	16.25	4.75	0
5	0	0	5.25	69	0.75
6	4.25	14.75	12.75	43.25	0
7	36.25	7	0.5	3.5	27.75
8	21.25	5.25	16	17.75	14.75
9	0	0	11.25	60.75	3
10	20.5	0	2.25	45.75	5.5
11	60.25	0	0	2.25	12.5
12	40	0	6	29	0
13	0	0	0	1.75	73.25
14	52.75	0	1.25	19.5	1.5
15	0	0	8	56	11
16	13.5	4.25	12.5	20.25	24.5
17	0	0	0	0	75
18	48	0	3.5	4.75	18.75
19	3	2.5	18.75	0	50.75
20	0	75	0	0	0
21	52	0	11.25	9.5	2.25
22	8.5	0	0	66.5	0
23	34.5	1.5	2	21.5	15.5
24	24.75	0	0	7.75	42.5
25	48.75	4.75	13.5	8	0
26	52.25	17.25	5.5	0	0
27	25.75	0	3.75	1	44.5
28	1.25	0	2.25	7.5	64
29	48.25	0	2.5	1.25	23
30	0	13.25	0	2.75	59
MEDIA	**25.308**	**5.417**	**5.683**	**19.467**	**19.092**
SUMA	**759.250**	**162.500**	**170.500**	**584.000**	**572.750**

En la Figura 113 se muestran gráficamente los datos recogidos en la tabla anterior, ayudando así a su comprensión y facilitando el análisis de los resultados logrados para dicho espacio de trabajo. Se refleja el predominio, en esta segunda zona, de los grados de corrosión 3 y 4, pues juntos suman más de la mitad de la superficie, pero también la gran presencia de grado de corrosión 0.

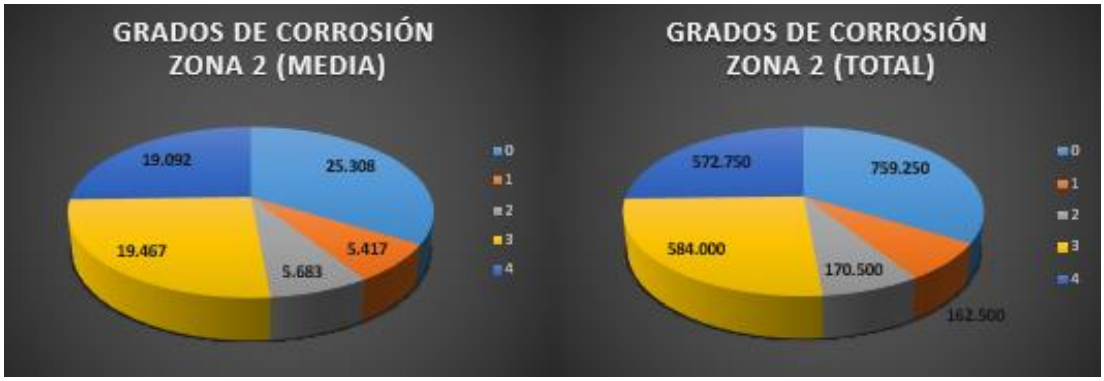


Figura 113. Grados de corrosión Zona 2 (Elaboración propia)

Los gráficos obtenidos por dispersión, a partir de los datos recogidos, se presentan en la Figura 114; el color rojo refleja los valores para el área libre de corrosión, en color gris aquellos referidos a la corrosión incipiente, representados en naranja los datos del área ocupado por grietas y picaduras, en color amarillo todo aquello cuya mayor parte del área está corroída y, por último, en color azul los datos de los tramos de barandilla totalmente corroídos. En esta Zona 2 todos los valores están mucho más parejos que en la primera, sobre todo, se ve que la corrosión ya está demasiado presente en todas las barandillas objeto de estudio.

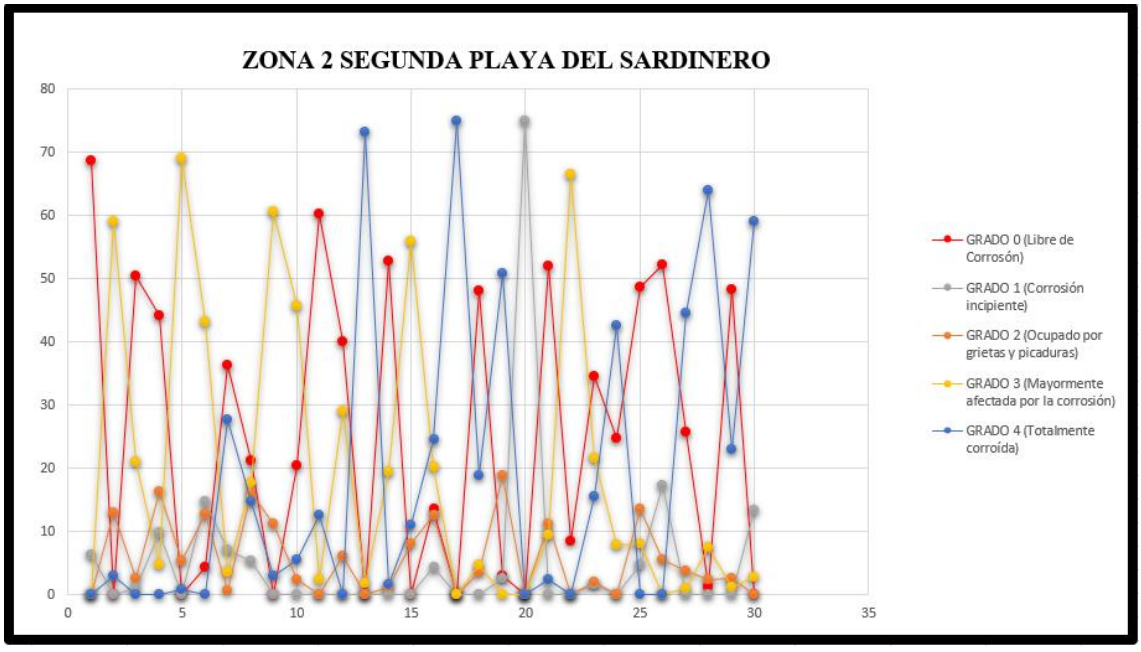


Figura 114. Dispersión de los distintos grados de corrosión en la Zona 2 (Elaboración propia)

La Figura 115 ofrece una combinación de dos imágenes representativas de esta Zona 2 de estudio. Hay que resaltar que en esta zona los golpes del mar son muy frecuentes, lo

que provoca la pérdida de material en muchas zonas de la estructura, por el impacto del oleaje con las barandillas, lo que provoca tanto la erosión y desgaste de la pintura como del substrato metálico, repleto de productos de corrosión sin resistencia mecánica.

Figura 115. Fotografías tomadas en la Zona 2 (Elaboración propio)

4.1.3.- Zona 3

Por último, para la tercera y postrema zona seleccionada, se ha seguido el mismo patrón que para los dos anteriores. Los datos obtenidos del análisis fotográfico mediante Matlab se han recogido en la Tabla 20.

Tabla 20. Datos obtenidos del análisis de imágenes en la Zona 3 (Elaboración propia)

FOTO	ZONA 3 / Área interés (cm^2)				
Imágenes	**Grado 0**	**Grado 1**	**Grado 2**	**Grado 3**	**Grado 4**
1	0	0	11	63	1
2	0	0	0	6.25	68.75
3	0	0	0	5.75	69.25
4	0	0	21	29.75	24.25
5	0	0	10.25	54.25	10.5
6	0	0	16.5	58.5	0
7	54.5	5	8.75	6.75	0
8	0	0	8	61	6
9	0	1.5	16.25	7.25	50
10	0	0	1.75	2.25	71
11	0	0	0	2	73
12	0	0	0	0.75	74.25
13	0	33	4.25	14	23.75
14	0	2.5	13	6.5	53
15	0	0	0	0	75
16	0	13	0	62	0
17	0	0	0	0.5	74.5
18	0	0	0	0	75
19	0	13.25	61.75	0	0
20	0	0	0	10	65
21	0	0	7.25	3.5	64.25
22	0	41.75	11.75	13.25	8.25
23	24.25	0	0	7	43.75
24	0	0	0	6	69
25	0	48.75	13	6.75	6.5
26	29.25	0	44.5	1.25	0
27	61	0	0	0.75	13.25
28	0	0	0	0	75
29	0	0	0	0	75
30	0	18.25	0	2.5	54.25
MEDIA	**5.633**	**5.900**	**8.300**	**14.383**	**40.783**
SUMA	**169.000**	**177.000**	**249.000**	**431.500**	**1223.500**

A modo de resumen, al igual que en las dos zonas previas, se traducen los datos recogidos en la tabla anterior, en sendas gráficas presentadas en la Figura 116, ayudando así a la comprensión de los valores obtenidos. Tras las inspecciones visuales y el estudio del entorno, todo apuntaba hacia esta Zona de la Playa como la más afectada, y así lo ratifican los resultados obtenidos del análisis fotográfico. El grado de corrosión más elevado, que

corresponde a zonas más deterioradas, denominado grado 4, área totalmente corroída, ocupa el puesto más alto del pódium en esa Zona.

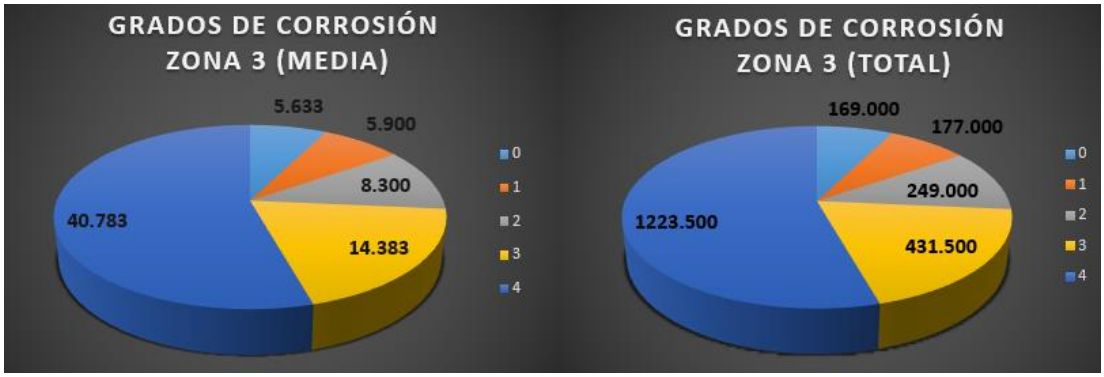


Figura 116. Grados de corrosión Zona 3 (Elaboración propia)

Concordando, como decíamos, con las inspecciones visuales llevadas a cabo varias veces a lo largo del desarrollo del presente proyecto, esta Zona es la más afectada por la corrosión, coincidiendo así con su exposición absoluta a fenómenos atmosféricos como son el constante golpeo de las olas del mar y el viento del norte. El grado de daño que predomina en la Ensenada del Sardinero (Zona 3) es el Grado 4, zonas de barandilla totalmente corroídas. Se ha podido observar durante los meses posteriores a la adquisición de las fotografías, la pérdida progresiva de tramos de barandilla en esta zona, situación que ha sido retocada recientemente ubicando nuevos tramos de barandilla (Semana Santa marzo 2021)

En la Figura 117 se presentan los datos recogidos para la Zona 3 mediante un gráfico de dispersión, siguiendo el modelo utilizado en las zonas previas, la línea azul (Grado 4) sobresale por encima de todas las demás.

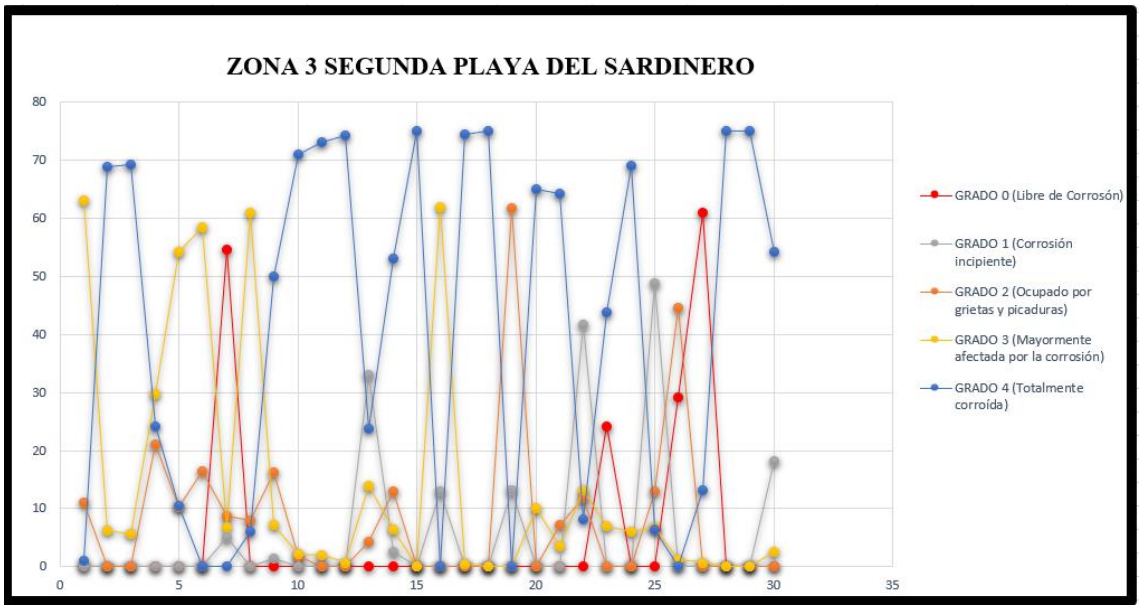


Figura 117. Dispersión de los distintos grados de corrosión en la Zona 3 (Elaboración propia)

Definitivamente, esta es la zona más afectada, deteriorada por corrosión, de toda la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero; como muestra de ello, se presentan en la Figura 118 dos fotografías representativas tomadas en esta zona, donde apenas queda presencia estructural.

Figura 118. Fotografías representativas de la Zona 3 (Elaboración propia)

4.2.- Grado de corrosión de cada zona seleccionada

El siguiente paso, una vez terminado el análisis fotográfico de todas las imágenes objeto de este Proyecto y posterior a la recogida de los datos necesarios para trabajar, es el de aplicar, a cada una de las zonas, los siguientes pasos:

A) Leer los valores físicos: área libre de corrosión, área ocupada por grietas y picaduras, área de corrosión incipiente, área mayormente afectada por la corrosión y área totalmente corroída.
B) Calcular las funciones de pertenencia (FP), de los términos lingüísticos para cada una de las variables. Este paso se conoce como *Fuzzyficación*.
C) Generar las reglas IF-THEN, basándose en el motor de interferencia *Fuzzy*.
D) Calcular el valor físico de cada variable de salida, es decir, el grado de corrosión. Se denomina este último movimiento como Deffuzyficación.

En los siguientes subapartados se muestran los resultados obtenidos para cada uno de estos pasos, seguidos en función de la zona correspondiente. Estos resultados que aparecen a continuación se presentan de forma breve y concisa, para mayor detalle ver el Anexo III.

4.2.1.- Zona 1

Paso 1

De la Tabla 21, resumen de la Zona 1, se extraen los siguientes valores físicos de cada una de las variables de entrada, que se recogen en la Tabla 21:

Tabla 21. Valores de las variables de entrada de la Zona 1 (Elaboración propia)

ÁREA	cm^2
Libre de corrosión	1449,750
Corrosión incipiente	252,250
Grietas y picaduras	243,750
Mayormente afectada	186,050
Totalmente corroída	145,250

Paso 2

A partir de los datos del paso anterior, y empleando el *Toolbox Fuzzy Logic* de Matlab, se calculan las funciones de pertenencia de los términos lingüísticos correspondientes a cada una de ellas.

En la Figura 119 se muestra el Área libre de corrosión, esta gráfica ha sido obtenida de Matlab una vez insertados todos los valores correspondientes a las distintas variables de trabajo.

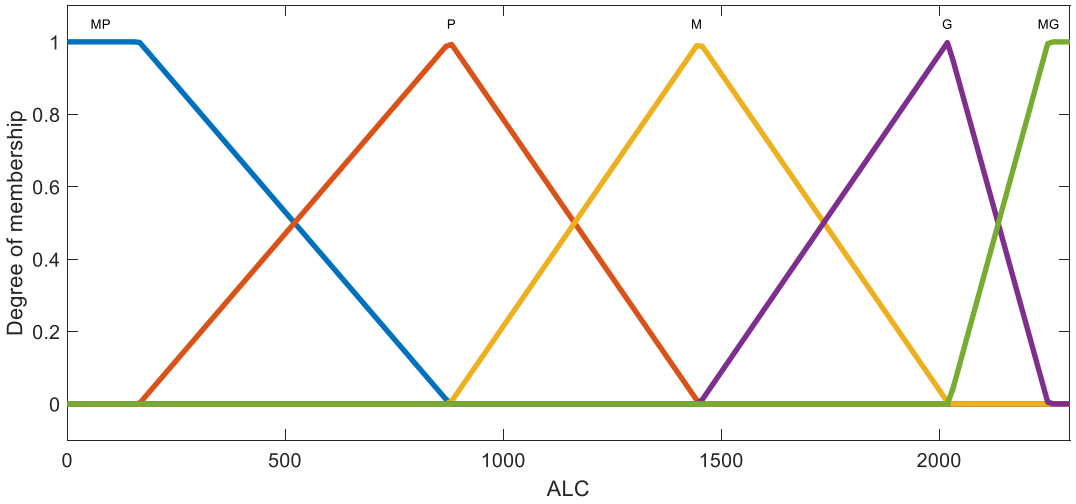


Figura 119. Representación del área libre de corrosión (Elaboración propia)

Los valores del grado de pertenencia son, para la variable de entrada Media de 0.989 y para la variable Pequeña de 0,0058.

En la Figura 120 se representa la gráfica obtenida de Matlab correspondiente al Área de corrosión incipiente.

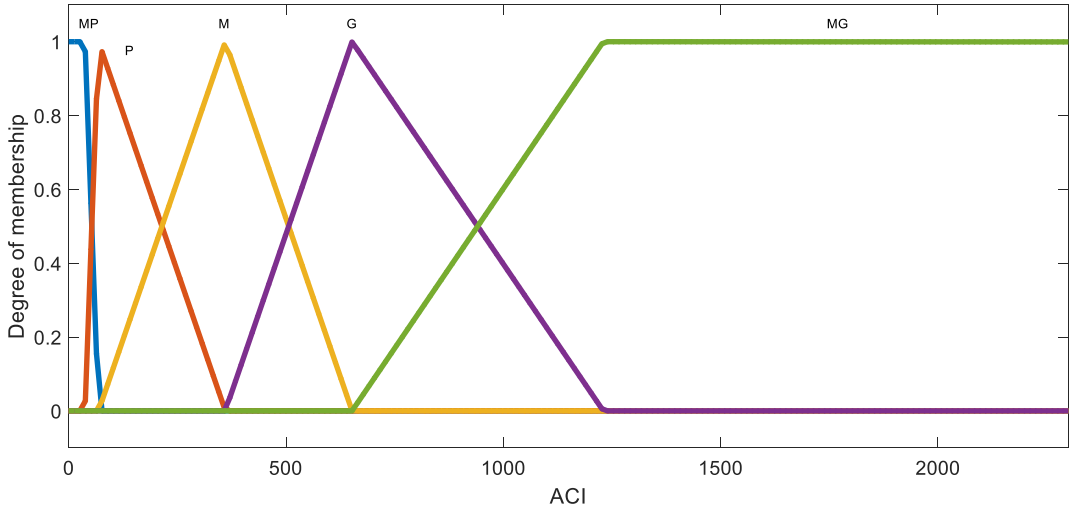


Figura 120. Representación del Área de corrosión incipiente (Elaboración propia)

Para esta área, los valores del grado de pertenencia son, para la variable de entrada Media de 0.627 y para la variable Pequeña de 0,371.

A continuación, en la Figura 121, tenemos representada la gráfica correspondiente al Área ocupada por grietas y picaduras.

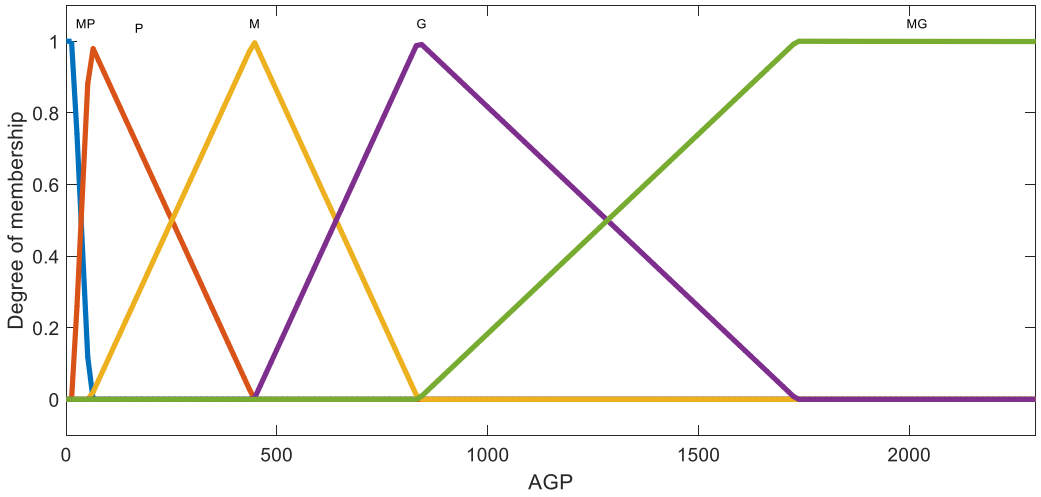


Figura 121. Representación del Área ocupada por grietas y picaduras (Elaboración propia)

Obtenemos los siguientes valores del grado de pertenencia: para la variable de entrada Media de 0.483 y para la variable Pequeña de 0,519.

La gráfica de entrada de Matlab correspondiente al Área mayormente afectada por la corrosión se representa en la Figura 122.

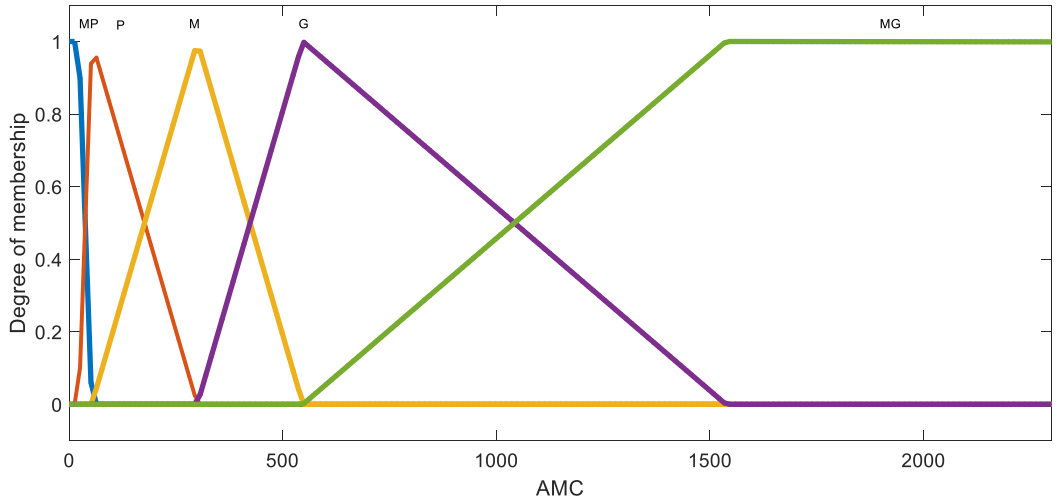


Figura 122. Representación del Área mayormente afectada por la corrosión (Elaboración propia)

Los valores del grado de pertenencia son: para la variable de entrada Media de 0.544 y para la variable Pequeña de 0,462.

Por último, en la Figura 123 se muestra la gráfica correspondiente al Área totalmente corroída.

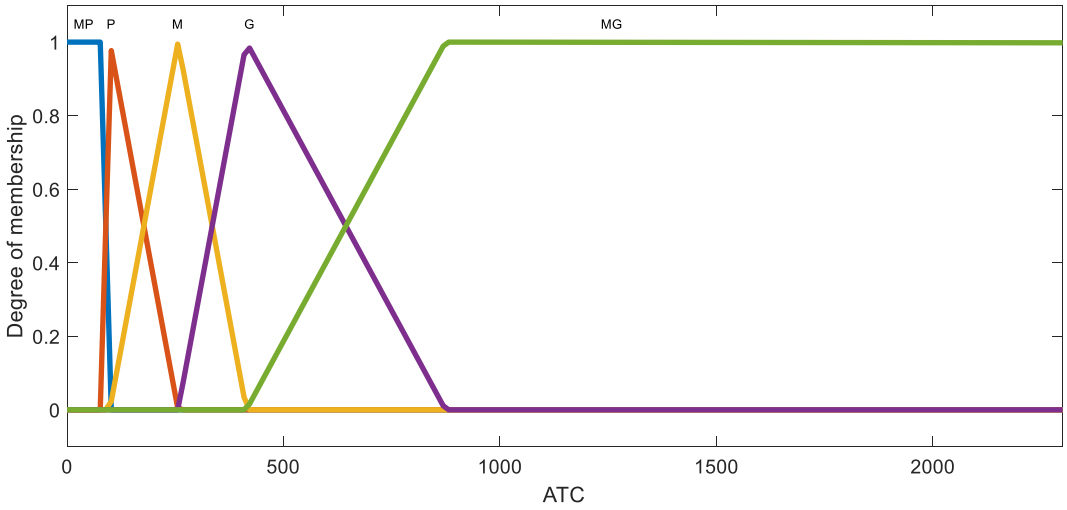


Figura 123. Representación del Área totalmente corroída (Elaboración propia)

Donde los valores del grado de pertenencia son: para la variable de entrada Media de 0.277 y para la variable Pequeña de 0,727.

De estas gráficas que se han venido representando, se obtienen los resultados recogidos en la Tabla 22, correspondientes a este primera zona, y que, junto al análisis fotográfico, nos permitirán alcanzar los resultados buscados desde el momento inicial. Para esta Zona 1, todos los datos corresponden a valores de corrosión Media (M) y Pequeña (P), esto cambiará a medida que estudiamos las zonas elegidas.

Tabla 22. Resultados de la etapa de *Fuzzyficación* en la Zona 1 (Elaboración propia)

	M	P
Área libre de corrosión	0.989	0.0058
Área de corrosión incipiente	0.627	0.371
Área ocupada por grietas y picaduras	0.483	0.519
Área mayormente corroída	0.544	0.462
Área totalmente corroída	0.277	0.727

Paso 3

Ahora es el turno de las reglas *IF-THEN*, basadas en el Motor de Interferencia *Fuzzy*. En la zona con la que estamos trabajando, es decir, la Zona 1, y fijándonos en la Tabla anterior, observamos que es necesario tomar las matrices correspondientes al área libre de corrosión, medio y bajo, al que le corresponden los siguientes valores:

M=0.989 y P=0.0058

Por lo tanto, el motor de interferencia aplicado a la Zona 1 es el que se muestra en la Figura 124.

	P				
	MP	P	M	G	MG
MP	X	X	X	A	A
P	X	M	M	M	A
M	X	B	M	M	M
G	B	B	B	M	M
MG	MB	MB	MB	X	X

	M				
	MP	P	M	G	MG
MP	X	X	A	A	A
P	X	A	A	A	A
M	M	M	M	M	M
G	B	B	M	M	X
MG	MB	B	B	M	X

Figura 124. Motor de interferencia Zona 1 (Elaboración propia)

La Tabla 23 detalla las reglas *Fuzzy* para la Zona 1, recordando la nomenclatura de las variables de salida referidas al grado de corrosión: MB (muy bajo), B (bajo), M (medio), A (alto) y MA (muy alto).

Tabla 23. Reglas IF-THEN Zona 1 (Elaboración propia)

REGLA 1	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 2	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 3	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es M.. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 4	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 5	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M (medio), el área de corrosión incipiente es G, el área ocupada por grietas y picaduras es M.. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 6	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es G, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 7	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 8	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es MP, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 9	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es MP, el área ocupada por grietas y picaduras es MG. Entonces el grado de corrosión es MB.
REGLA 10	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es MG. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 11	IF THEN	Si el área libre de corrosión es M, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es MG. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 12	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 13	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 14	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 15	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P (pequeño), el área de corrosión incipiente es G, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 16	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 17	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 18	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es MP, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 19	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es MP, el área ocupada por grietas y picaduras es MG. Entonces el grado de corrosión es MB.
REGLA 20	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es P, el área ocupada por grietas y picaduras es MG. Entonces el grado de corrosión es MB.
REGLA 21	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es B.
REGLA 22	IF THEN	Si el área libre de corrosión es P, el área de corrosión incipiente es M, el área ocupada por grietas y picaduras es MG. Entonces el grado de corrosión es MB.

Dichas reglas han de introducirse en la *Fuzzy Toolbox* de Matlab, La Figura 125 se muestra como quedaría la interfaz una vez añadidas, una por una, las reglas definidas para esta primera zona.

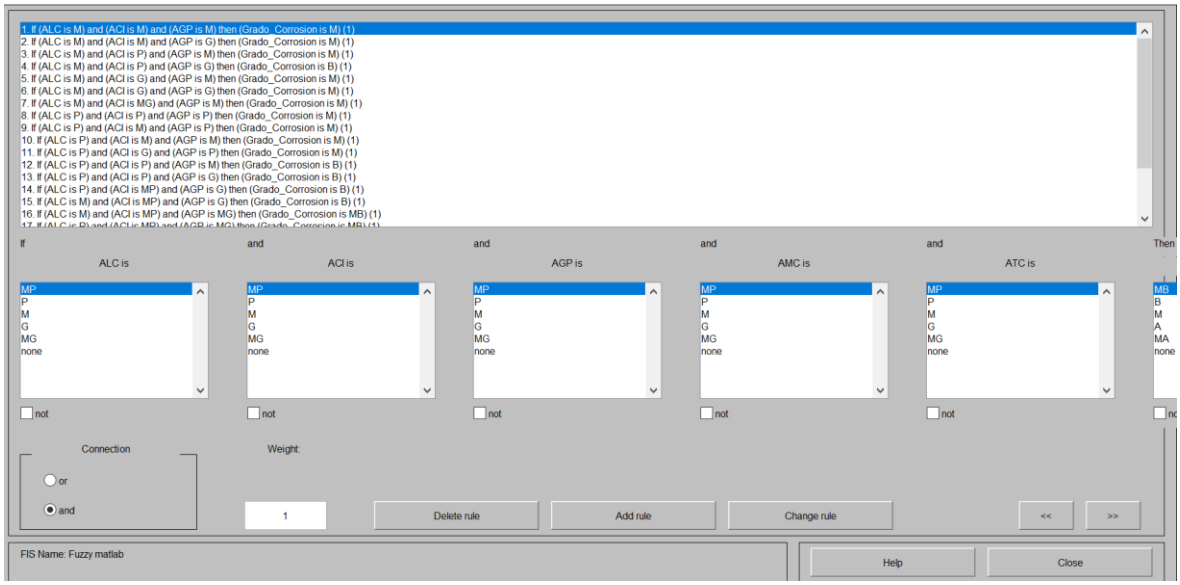


Figura 125. Editor de reglas de la *Fuzzy Toolbox* de Matlab, *Rule Editor* (Elaboración propia)

Una vez introducidas todas las reglas, el último paso para obtener el grado de corrosión, es aplicar la *defuzzificación* mediante el **método del centroide**. Este proceso está automatizado mediante la herramienta FIS de la *toolbox* de Matlab y nos proporciona una visión de las reglas de interferencia y del resultado final de corrosión (Figura 126).

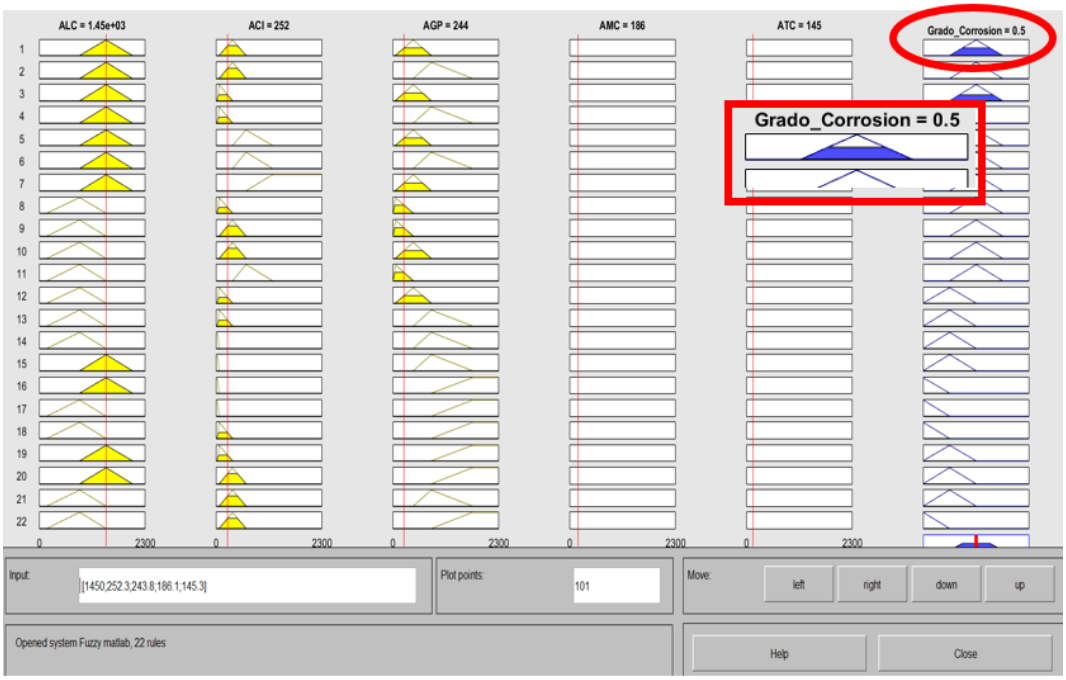


Figura 126. Defuzzificación Zona 1 (Elaboración propia)

En la parte superior derecha, se muestra el resultado que estamos buscando, el grado de corrosión de la primera Zona de estudio es de **0,5.**

4.2.2.- Zona 2

Paso 1

En la Tabla 24 se muestran los valores físicos de cada una de las variables de entrada de la Zona 2, cuyos datos han sido recogidos de la Tabla 19.

Tabla 24. Valores de las variables de entrada de la Zona 2 (Elaboración propia)

ÁREA	cm^2
Libre de corrosión	759,250
Corrosión incipiente	162,500
Grietas y picaduras	170,500
Mayormente afectada	584,000
Totalmente corroída	572,750

Paso 2

A partir de todos los datos obtenidos del análisis fotográfico de esta segunda zona, calculamos las funciones de pertenencia de todos los términos lingüísticos de cada una de ellas a partir de los criterios mencionados en el Capítulo 3.

En la Figura 127 se muestra el Área libre de corrosión, esta gráfica ha sido obtenida mediante Matlab una vez insertados todos los valores correspondientes a las distintas variables de trabajo.

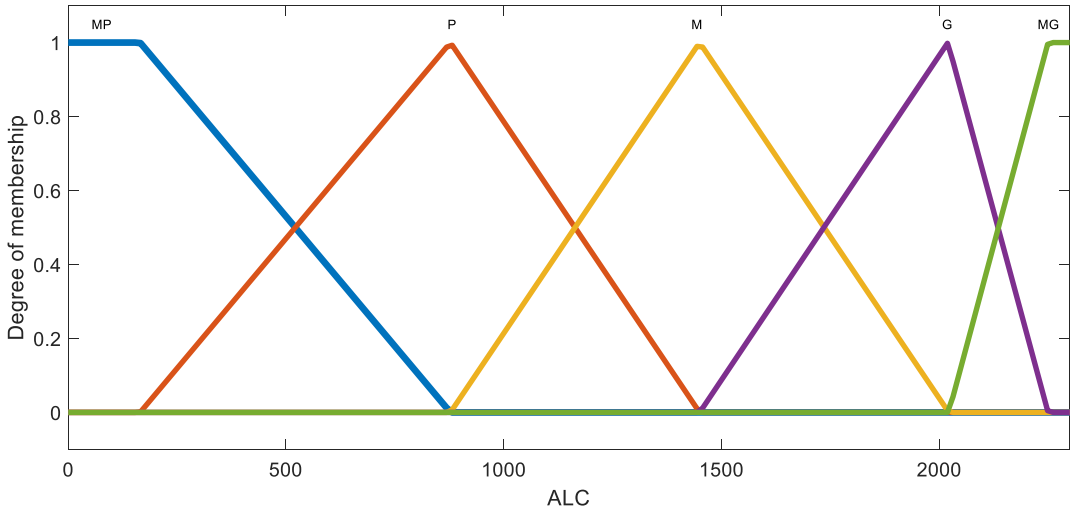


Figura 127. Gráfica *Fuzzy* para el Área libre de corrosión de la Zona 2 (Elaboración propia)

De esta gráfica se obtienen los valores del grado de pertenencia, para la variable de entrada Pequeña es de 0.832 y para la variable Media es de 0,164.

En la Figura 128 se representa el Área de corrosión incipiente.

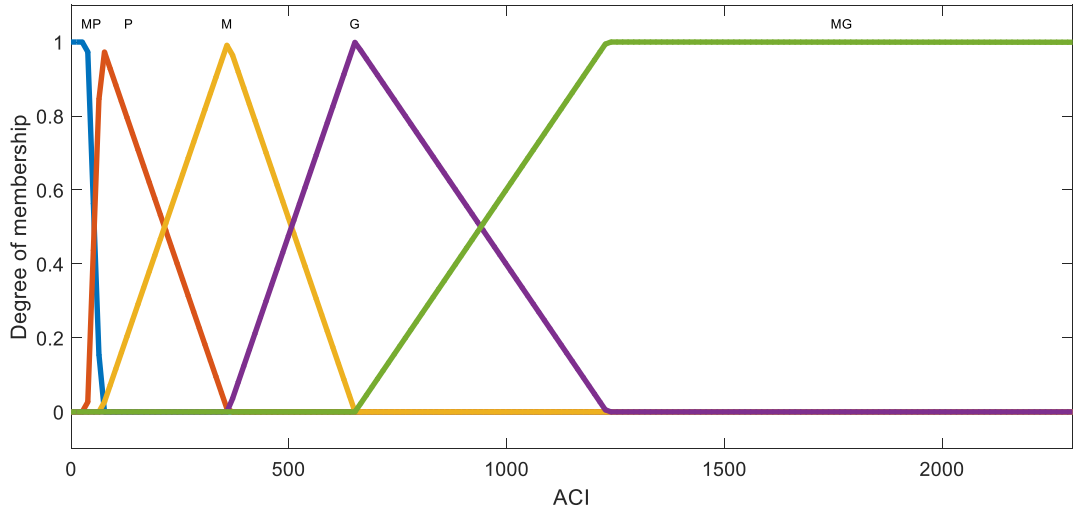


Figura 128. Gráfica *Fuzzy* para el Área de corrosión incipiente de la Zona 2 (Elaboración propia)

Los valores que se obtienen de dicha gráfica son tanto el grado de pertenencia para la variable de entrada Media, con un valor de 0,325, y la variable de entrada Pequeña con un valor de 0,677. En la Figura 129 se representa la gráfica *fuzzy* para el Área ocupada por grietas y picaduras.

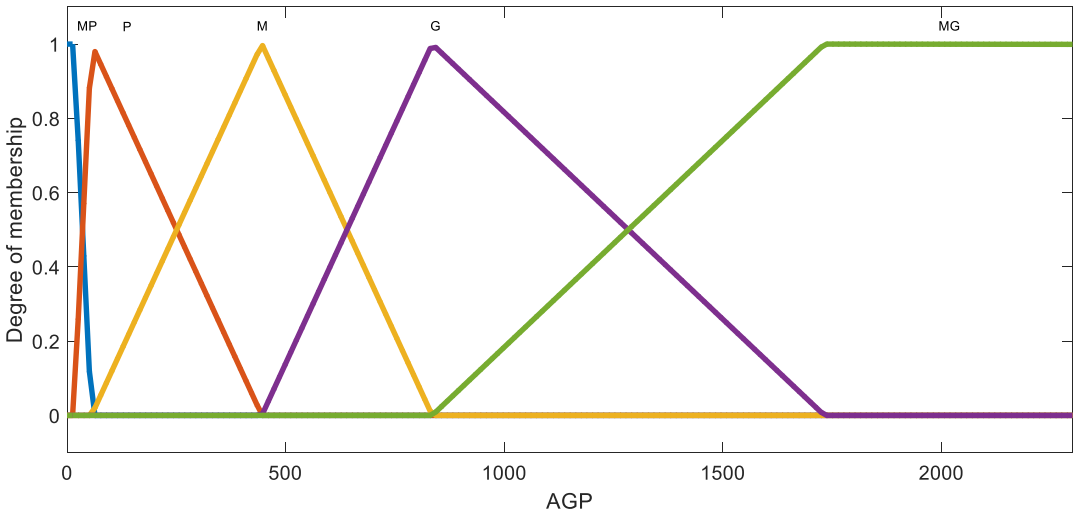


Figura 129. Gráfica *Fuzzy* para el Área de corrosión incipiente de la Zona 2 (Elaboración propia)

Podemos observar que el grado de pertenencia para la variable de entrada Media es 0,294, y para la variable Pequeña 0,704.

En la Figura 130 se representa la gráfica correspondiente al Área mayormente afectada por la corrosión.

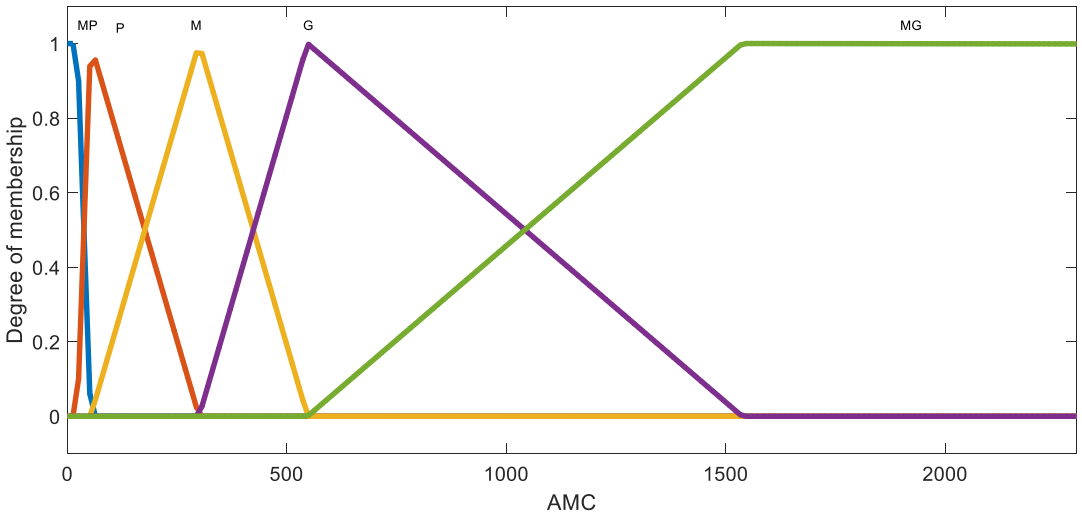


Figura 130. Gráfica *Fuzzy* para el Área mayormente afectada por la corrosión de la Zona 2 (Elaboración propia)

A partir de dicha gráfica adquirimos los valores para las funciones de pertenencia de la variable de entrada Grande de 0,963 y para la variable de entrada Muy Grande de 0,0371.

Por último, en la Figura 131, se representa la gráfica correspondiente al Área totalmente corroída.

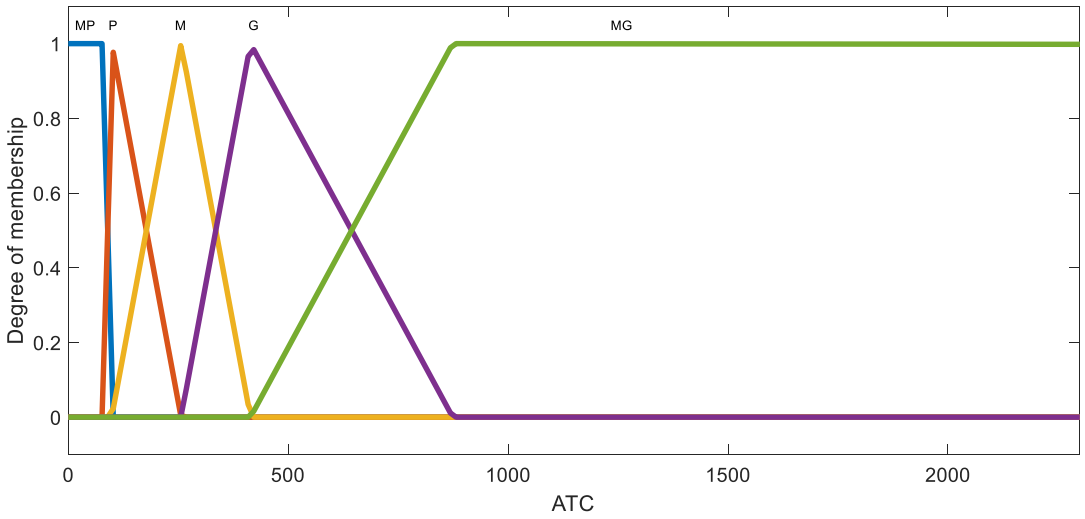


Figura 131. Gráfica *Fuzzy* para el Área totalmente corroída de la Zona 2 (Elaboración propia)

Los valores representativos que nos ofrece dicha gráfica son de 0,655 y 0,346 para las variables de entrada Grande y Muy Grande respectivamente.

En la Tabla 25 se muestra el resumen de los resultados obtenidos durante el proceso de *Fuzzyficación*; en este caso cambian los valores de las reglas de control, teniendo datos de Muy Pequeña (MP), Pequeña (P), Media (M), Grande (G) y Muy Grande (MG).

Tabla 25. Valores de las variables de entrada de la Zona 2 (Elaboración propia)

Área libre de corrosión	MP: 0.164	P: 0.832
Área de corrosión incipiente	M: 0.325	P: 0.677
Área ocupada por grietas y picaduras	M: 0.294	P: 0.704
Área mayormente afectada por la corrosión	MG: 0.0371	G: 0.963
Área totalmente corroída	MG: 0.346	G: 0.655

Paso 3

Basándonos en el motor de interferencia *Fuzzy*, se general las reglas *IF-THEN*. Se toman para esta zona las matrices correspondientes al área mayormente afectada por la corrosión grande y muy grande, pues se observa en la Tabla 25 que a esta área le corresponden los valores de **MG: 0,0371** y **G: 0,963** de la función de pertenencia.

En la Figura 132 se muestra el motor de interferencia aplicado a la Zona 2 para los datos seleccionados. La Tabla 26 se representan las reglas *IF-THEN* correspondientes a dicha zona.

	G				
	MP	P	M	G	MG
MP	A	MA	MA	MA	MA
P	A	A	MA	MA	MA
M	A	M	A	A	MA
G	MP	M	M	X	X
MG	B	M	M	X	X

	MG				
	MP	P	M	G	MG
MP	MA	MA	MA	MA	MA
P	A	MA	MA	MA	MA
M	A	A	A	MA	X
G	A	M	M	MA	X
MG	M	M	X	X	X

Figura 132. Motor de interferencia para la Zona 2 de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)

Tabla 26. Reglas IF-THEN Zona 2 (Elaboración propia)

REGLA 1	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es M, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 2	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es M, el área de corrosión incipiente es G. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 3	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es M, el área de corrosión incipiente es MG. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 4	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es G, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 5	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es G, el área de corrosión incipiente es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 6	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es G, el área de corrosión incipiente es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 7	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es P, el área de corrosión incipiente es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 8	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es M, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 9	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es G, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 10	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es M, el área de corrosión incipiente es G. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 11	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es M, el área de corrosión incipiente es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 12	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MG, el área de corrosión incipiente es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 13	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es P, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 14	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es P, el área de corrosión incipiente es G. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 15	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es MP, el área de corrosión incipiente es MP. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 16	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es MP, el área de corrosión incipiente es P. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 17	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MP, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 18	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MP, el área de corrosión incipiente es P. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 19	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es MP, el área de corrosión incipiente es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 20	IF THEN	Si el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es P, el área de corrosión incipiente es P. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 21	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MG, el área de corrosión incipiente es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 22	IF THEN	Si el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MP, el área de corrosión incipiente es G. Entonces el grado de corrosión es A.

Una vez introducidas todas las reglas, el último paso para obtener el grado de corrosión, al igual que en la primera Zona, es aplicar la *defuzzificación* mediante el **método**

del centroide. En la Figura 133 se muestra la visión gráfica de dichas reglas y el resultado final de corrosión.

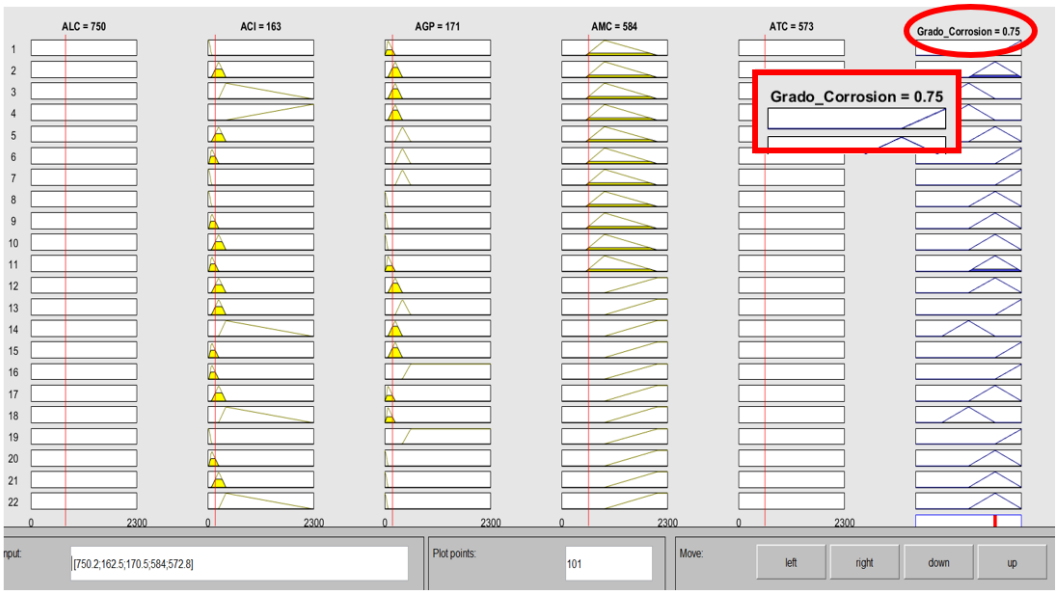


Figura 133. *Defuzzificación* de la Zona 2 (Elaboración propia)

Como resultado, en la parte superior derecha, observamos que el grado de corrosión de la segunda Zona de estudio es de **0,75.**

Hasta este punto, los resultados obtenidos al aplicar el Método *Fuzzy* a través de la *toolbox* correspondiente en Matlab, verifican las ideas obtenidas de las inspecciones realizadas como paso previo a desarrollar este Proyecto. Destacar la importancia de la inspección visual, para mentalizarse de lo que supone el fenómeno de la corrosión, siendo una herramienta esencial que ayuda a adquirir con criterio las fotografías adecuadas que permitan manipular los datos de la forma correcta y deseada.

Por último, se estudia a continuación, la tercera Zona.

4.2.3.- Zona 3

Paso 1

En la Tabla 27 se representan los valores físicos de cada una de las variables de entrada para la tercera Zona, valores obtenidos de la Tabla 20, donde se reflejan todos los valores adquiridos para esta Zona 3.

Tabla 27. Valores de las variables de entrada en la Zona 3 (Elaboración propia)

ÁREA	cm^2
Libre de corrosión	169,000
Corrosión incipiente	177,000
Grietas y picaduras	249,000
Mayormente afectada	431,500
Totalmente corroída	1223,500

Paso 2

A continuación, se representan todas las gráficas obtenidas de Matlab para calcular las funciones de pertenencia de los términos lingüísticos de cada una de ellas, como hemos venido haciendo para las dos zonas anteriores. En la Figura 134 se muestran los valores del Área libre de corrosión, Se aprecia que el grado de pertenencia para la variable de entrada Pequeña es de 0.00561 y para la variable Muy Pequeña es de 0,9944.

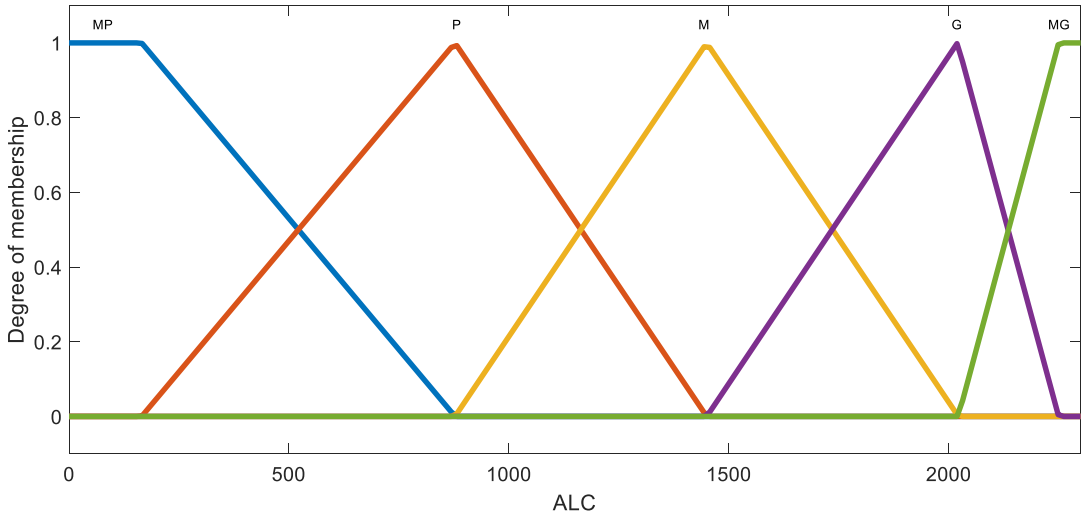


Figura 134. Gráfica *Fuzzy* para el Área libre de corrosión de la Zona 3 (Elaboración propia)

En la Figura 135, se muestra la gráfica obtenida en la Zona 3 para el Área de corrosión incipiente tras la introducción de los valores de las variables de entrada. Se puede observar que el grado de pertenencia para la variable de entrada Pequeña es de 0.628 y para la variable Media 0.373.

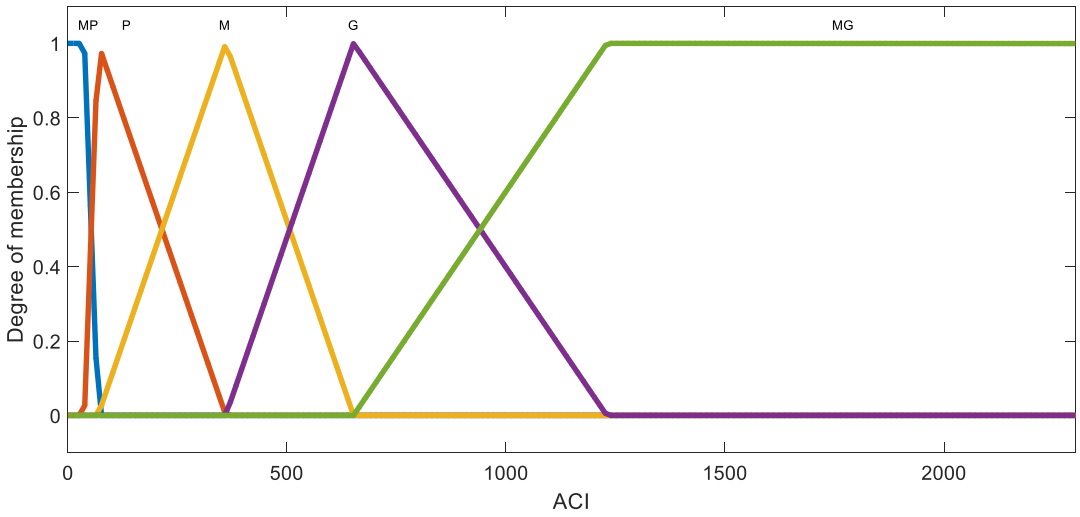


Figura 135.Gráfica *Fuzzy* para el Área de corrosión incipiente de la Zona 3 (Elaboración propia)

En la Figura 136 se muestra la gráfica correspondiente al Área ocupada por grietas y picaduras.

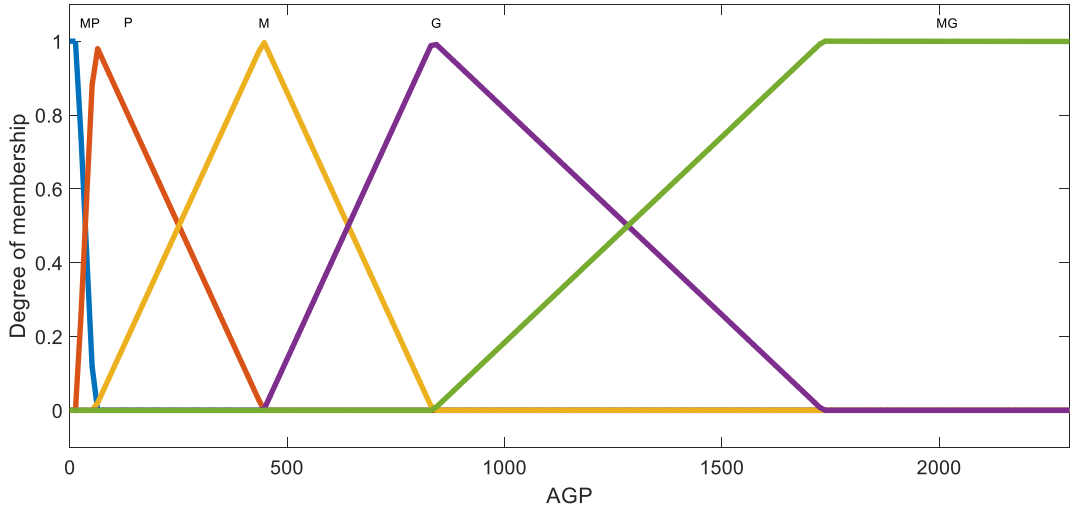


Figura 136. Gráfica *Fuzzy* para el Área ocupada por Grietas y Picaduras del de la Zona 3 (Elaboración propia)

Para esta Zona 3, los valores del grado de pertenencia correspondientes al Área ocupada por grietas y picaduras son de 0.5048 para la variable de entrada Pequeña y 0.4957 para la variable Media.

La Figura 137, se representa la gráfica que recoge los datos del Área mayormente afectada por la corrosión, en donde se observa que el grado de pertenencia para la variable de entrada Media es de 0.4684 y para la variable Grande es de 0,5321.

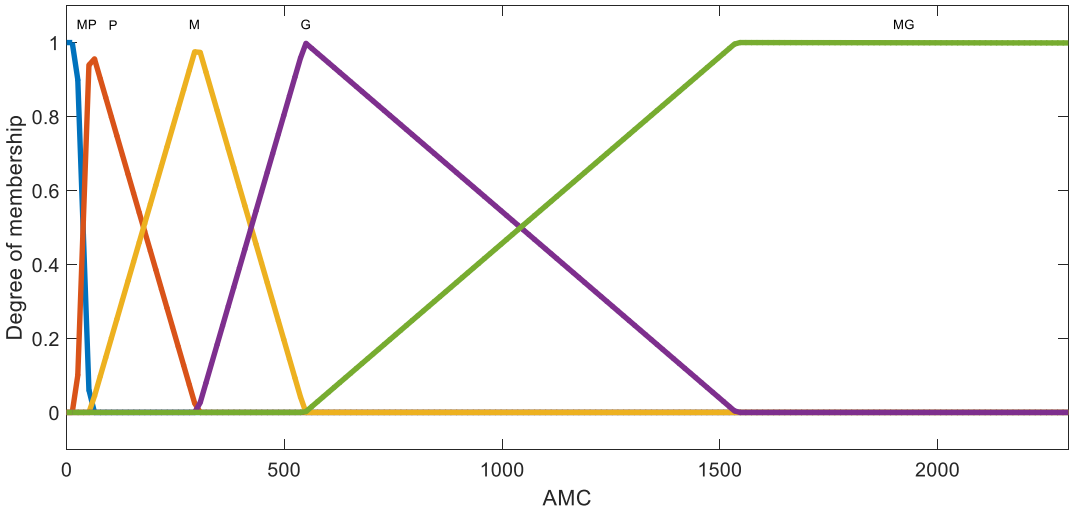


Figura 137. Gráfica *Fuzzy* para el Área Mayormente afectada por la corrosión de la Zona 3 (Elaboración propia)

Por último, en la Figura 138, se muestra la gráfica correspondiente al Área totalmente corroída.

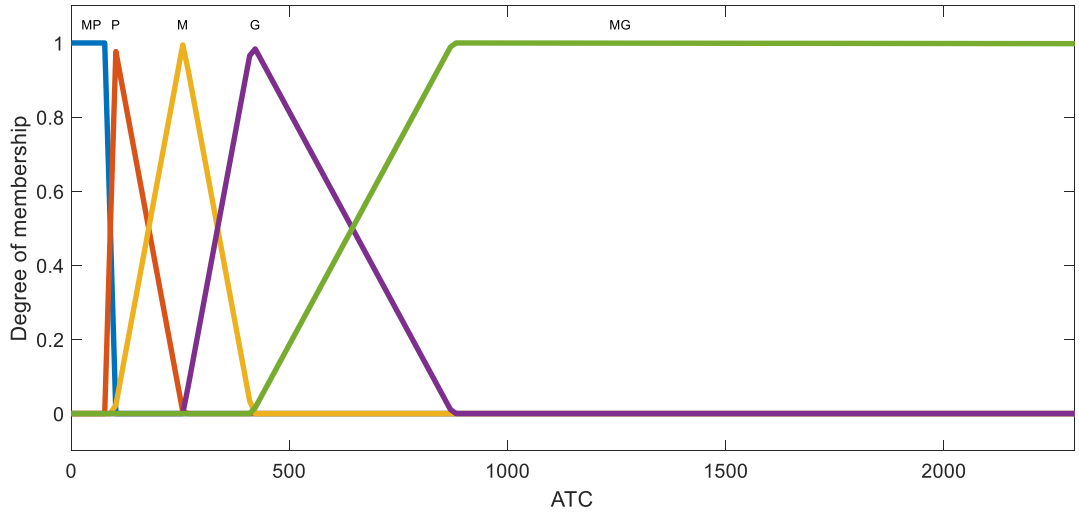


Figura 138. Gráfica *Fuzzy* para el Área totalmente corroída de la Zona 3 (Elaboración propia)

En este caso, los valores correspondientes al grado de pertenencia significativos son 0.0001 y 0.9991 para la variable de entrada Grande 0.0001 y para la variable Muy Grande respectivamente.

En la Tabla 28 se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante este proceso de *Fuzzyficación* enfocado en la Zona 3.

Tabla 28. Valores de las variables de entrada de la Zona 2 (Elaboración propia)

Área libre de corrosión	MP: 0.9944	P: 0.0056
Área de corrosión incipiente	P: 0.628	M: 0.373
Área ocupada por grietas y picaduras	P: 0.5048	M: 0.5047
Área mayormente afectada por la corrosión	G: 0.5321	M: 0.4684
Área totalmente corroída	MG: 0.9991	G: 0.0001

Paso 3

Basándonos en el motor de interferencia *Fuzzy*, como para las dos Zonas anteriores, se generan las reglas *IF-THEN*. Se toman para esta Zona las matrices correspondientes al área totalmente corroída grande y muy grande, pues se observa en la Tabla 28 que a esta área le corresponden los valores de **MG: 0,9991** y **G: 0,0001** de la función de pertenencia.

En la Figura 139 se muestra el motor de interferencia aplicado a la Zona 3 para los datos seleccionados y la Tabla 29 detalla las reglas *IF-THEN* correspondientes a dicha zona.

	G				
	MP	P	M	G	MG
MP	A	MA	MA	MA	MA
P	A	A	MA	MA	MA
M	A	M	A	A	MA
G	MP	M	M	X	X
MG	B	M	M	X	X

	MG				
	MP	P	M	G	MG
MP	MA	MA	MA	MA	MA
P	A	MA	MA	MA	MA
M	A	A	A	MA	X
G	A	M	M	MA	X
MG	M	M	X	X	X

Figura 139. Motor de interferencia para la Zona 3 de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)

Tabla 29. Reglas IF-THEN correspondientes a la Zona 3 (Elaboración propia)

REGLA 1	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 2	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 3	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 4	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 5	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 6	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 7	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es M, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 8	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es M, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 9	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es P, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 10	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es P, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 11	IF THEN	Si el área totalmete corroída es G, el área mayormente corroída es MP, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 12	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 13	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es MG, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 14	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 15	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 16	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 17	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es G, el área ocupada por grietas y picaduras es G. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 18	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es M, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 19	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es M, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es MA.
REGLA 20	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es M, el área ocupada por grietas y picaduras es M. Entonces el grado de corrosión es A.
REGLA 21	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es M, el área ocupada por grietas y picaduras es P. Entonces el grado de corrosión es M.
REGLA 22	IF THEN	Si el área totalmete corroída es MG, el área mayormente corroída es MP, el área ocupada por grietas y picaduras es MP. Entonces el grado de corrosión es MA.

Una vez introducidas todas las reglas, el último paso para obtener el grado de corrosión, al igual que en las dos zonas anteriores, es aplicar la *defuzzificación* en Matlab mediante el **método del centroide**. En la Figura 140 se muestra la visión gráfica de dichas reglas y el resultado final de corrosión.

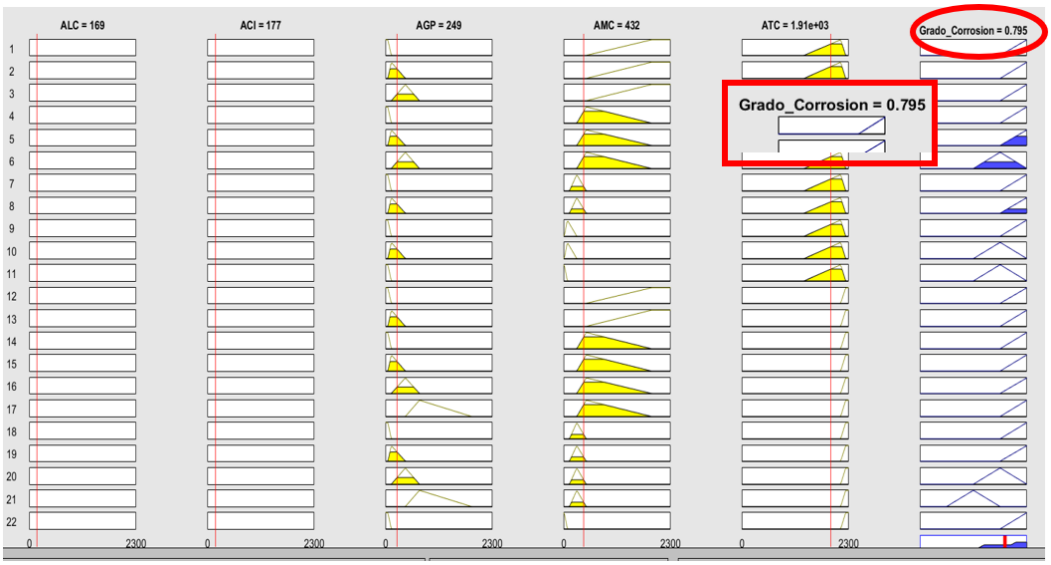


Figura 140. *Defuzzificación* de la Zona 3 (Elaboración propia)

Como resultado final, en la parte superior derecha, observamos que el grado de corrosión de la tercera Zona de estudio es de **0,795.** Esta tercera zona de estudio o Zona 3, es, apoyado en todos los resultados, tanto del análisis fotográfico como de la aplicación de la *Fuzzy Toolbox* de Matlab, la zona peor parada, en cuanto a corrosión se refiere, de la Segunda Playa del Sardinero.

4.3.- Análisis de los Resultados

Aunque en el apartado previo, y junto a los resultados obtenidos, se ha hecho un esbozo de análisis y diseñado unas conclusiones preliminares para cada Zona, en este bloque se quiere dar una visión detallada del mismo.

El fenómeno de la corrosión, como habíamos anunciado y descrito al inicio de este Trabajo Fin de Máster, está muy presente a lo largo de toda la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero. Tanto el análisis fotográfico como el uso de la herramienta de Matlab *Fuzzy Toolbox*, nos han servido para verificar las ideas obtenidas inicialmente, a partir de varias inspecciones visuales de las zonas de trabajo.

En la Tabla 30 se muestra un esquema comparativo de las tres zonas objeto de estudio con los valores obtenidos tras el análisis fotográfico, que nos permite observar la superficie que ocupan las variables abruptas para cada Zona. Confirmando así las ideas extraídas del análisis visual del entorno, la variable Área libre de corrosión disminuye progresivamente entre las tres zonas, reduciéndose en un 56,16% entre las zonas más extremas, la Zona 1 y

la 3. Los valores para el Área de corrosión incipiente, el Área ocupada por grietas y picaduras y el Área mayormente afectada por la corrosiómn se mantienen relativamente similares a lo largo de las tres Zonas. Por último, cabe destacar el gran aumento de la variable Área totalmente corroída, esta crece en un 48% entre la Zonas 1 y la Zona 3, verificando así la alta presencia de corrosión que se observa en la Ensenada del Sardinero.

Tabla 30. Distribución de la ocupación de las variables abruptas en cada Zona de estudio (Elaboración propia)

ZONA	Nº IMÁGENES	Área libre de corrosión	Área de corrosión incipiente	Área ocupada por grietas y picaduras	Área mayormente afectada por la corrosión	Área totalmente corroída
1	30	63,67%	11,08%	10,70%	8,17%	6,38%
2	30	33,76%	7,23%	7,58%	25,97%	25,47%
3	30	7,51%	7,87%	11,07%	19,18%	54,38%

En la Tabla 31 se recogen los datos obtenidos, en cuanto al grado de corrosión de cada zona de estudio, tras la aplicación del Método *Fuzzy*. Cabe recordar, con el fin de afianzar los resultados logrados, que la Zona 3, correspondiente a la Ensenada del Sardinero, es la más afectada por los ataques del mar, correspondiéndose así con un grado de corrosión superior al de las zonas contiguas.

Tabla 31. Resultados obtenidos del análisis mediante Matlab (Elaboración propia)

RESULTADOS FINALES GRADO DE CORROSIÓN	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
	0,5	0,75	**0,795**

Con todo ello, ya se está en condiciones de extraer las conclusiones más relevantes obtenidas tras la realización del presente Proyecto Fin de Máster, y que se exponen en el siguiente capítulo.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este Proyecto, que ha consistido en el análisis mediante la herramienta de la Lógica Difusa, de la corrosión en los distintos tramos de la barandilla de la Segunda playa del Sardinero, Santander, España, así como de todos los conocimientos aprendidos tanto antes como durante el desarrollo de éste, se exponen las siguientes conclusiones:

1. La ciudad de Santander, presentan un valor anual medio de humedad relativa de 75,4%, lo que la clasifica como una de las ciudades más húmedas del territorio nacional. Además, la proximidad al mar es el factor que más favorece la continua propagación del fenómeno de la corrosión, siendo ésta, fundamentalmente de tipo electroquímico o húmeda, inherente a un tipo de ambiente marino.

2. La corrosión por picaduras es la forma de corrosión predominante en la barandilla objeto de estudio. En este cabe destacar que se ha descrito como picadura esa corrosión incipiente que ha progresado a partir de la rotura local del recubrimiento orgánico que cubría tales componentes metálicos. Se observan tanto picaduras de dimensiones importantes, con diámetros que alcanzan los 11mm y que llevan a la rotura completa del material, como ampollas ocasionadas por el recubrimiento empleado sobre las picaduras existentes, debido al carácter altamente higroscópico de los productos de corrosión del hierro, óxidos e hidróxidos. Éstos, desprenden al recubrimiento por exceso de tensiones.

3. Los problemas de corrosión analizados vienen siendo provocados por errores diversos, desde la selección de los materiales empleados tanto en la construcción como en el mantenimiento, sin olvidar la etapa de diseño; asimismo se desconoce si se hizo alguna vez un análisis previo del entorno, junto con una correcta inspección y un adecuado mantenimiento continuo. Para evitar problemas una vez instalada una estructura, es necesario llevar a cabo un mantenimiento adecuado y hay que tratar de evitar, bajo todos los medios, aplicar pinturas sobre una estructura cuando está totalmente afectada por el fenómeno de la corrosión,

sin administrar de un tratamiento previo. Este es uno de los principales errores cometidos en las barandillas de la Playa de El Sardinero.

4. En la Zona 3, correspondiente a la Ensenada del Sardinero, el golpeteo del mar sobre la barandilla es continuo, dando lugar a un desprendimiento muy significativo y rápido de los recubrimientos protectores, pinturas, provocando cinéticas de corrosión muy elevadas sobre el substrato de acero de la barandilla, y la erosión del mismo, provocando, en muchos tramos, a la pérdida completa de, incluso, metros de material.

   Sin lugar a duda, la Zona 3 es la más afectada por la problemática de la corrosión, más de la mitad de los trechos de barandilla analizados se encuentran muy afectados, tan solo el 7,51% de los tramos examinados están libres de corrosión. Es en esta parte donde, continuamente, el paseo queda expuesto a los golpes del mar y en donde recientemente se ha reemplazado una barandilla que se rompió durante la pandemia.

   En la Figura 141 se muestra el estado de la barandilla en esta zona final de la Segunda Playa durante el pasado mes de marzo del presente año, tal y como se observa, la pérdida de material a lo largo de al menos 30 metros es total, obligando esto a proteger la zona a partir de barandillas auxiliares.

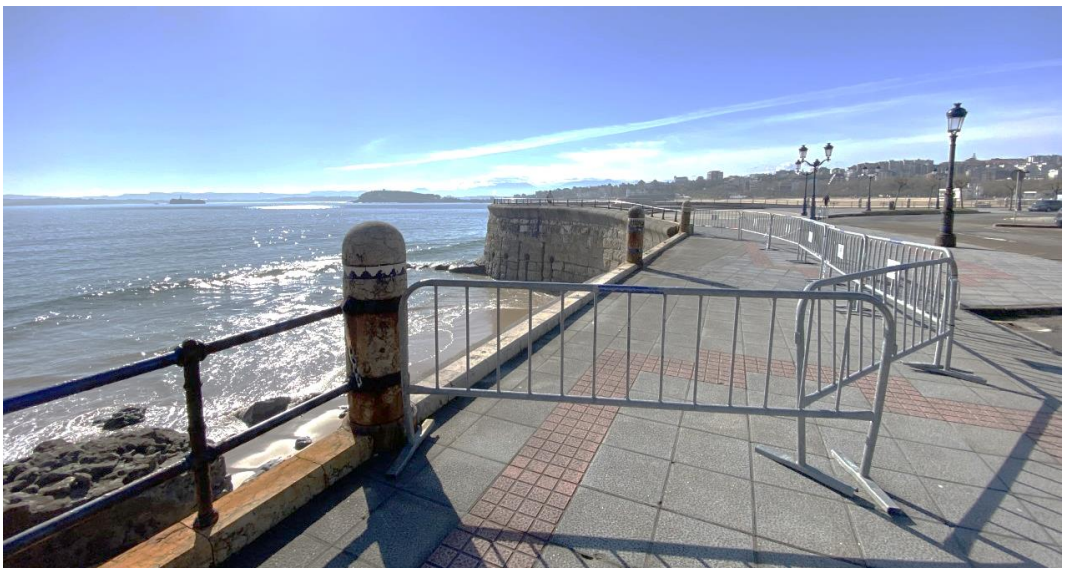


Figura 141. Estado de la barandilla de la Zona 3 en marzo de 2021
(Elaboración propia)

A principios del mes de abril de 2021, se ha llevado a cabo la colocación de un tramo de barandilla nueva en este entorno, como se puede ver en la Figura 142, siendo esta del mismo material y con los mismos acabados que la instalada con anterioridad, por lo tanto, en unos meses, previsiblemente volveremos a apreciar la pérdida de material en esta zona final de la Segunda Playa del Sardinero.

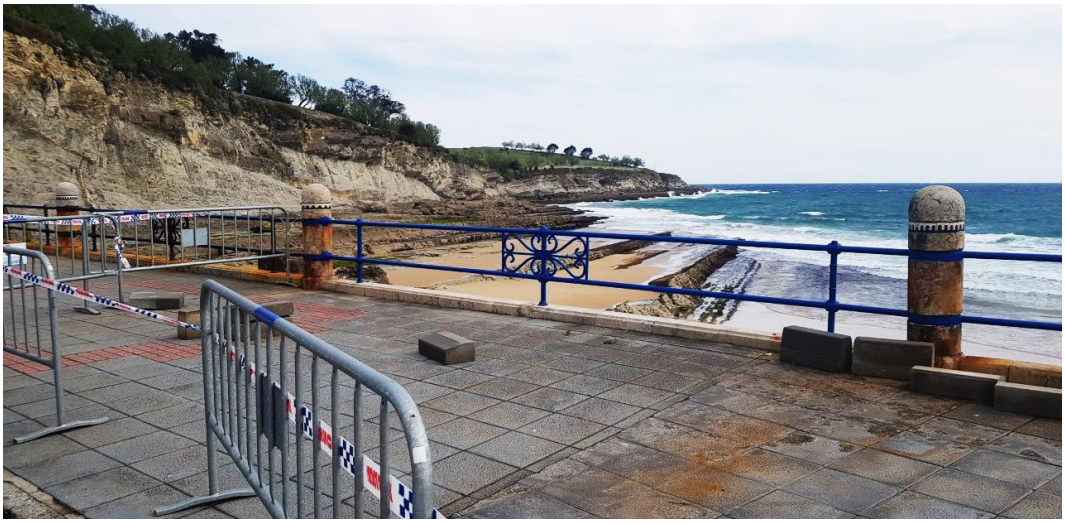


Figura 142. Estado de la barandilla de la Zona 3 en abril de 2021, reposición de la barandilla (Elaboración propia)

5. Considerando las cinco variables estudiadas; Área libre de corrosión, Área de corrosión incipiente, Área ocupada por grietas y picaduras, Área mayormente afectada por la corrosión y, por último, Área totalmente corroída, se recogen los siguientes resultados:

   El Área libre de corrosión predomina en las Zonas 1 y 2, con valores de 63.76% y 33.76% respectivamente, aunque en la segunda, correspondiente a la recta del Hotel Chiqui, los valores de Área mayormente afectada por la corrosión y Área totalmente corroída alcanzan valores muy importantes, 25.97% y 25.47% respectivamente, sumando entre ambos más de la mitad de la superficie analizada, por lo que el fenómeno de corrosión está muy presente.

6. La presencia de la corrosión es mucho menor en la Zona 1 que en el caso de las Zonas 2 y 3. Como se venía presagiando, la Zona 3, destaca por ser la más expuesta al golpeteo del mar, y sus valores son los más elevados. Los resultados

para la variable Área totalmente corroída obtenidos son los siguientes: 6,38% en la Zona 1; 24,47% en la Zona 2, y, por último, el valor más destacable; 54,38% en la Zona 3, dato realmente preocupante,

En la Tabla 32 se reflejan los resultados del grado de corrosión obtenidos al final de este estudio.

Tabla 32. Resultados finales obtenidos del análisis de la corrosión en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)

ZONA	Área libre de corrosión	Área de corrosión incipiente	Área ocupada por grietas y picaduras	Área mayormente afectada por la corrosión	Área totalmente corroída
1	63,67%	11,08%	10,70%	8,17%	6,38%
2	33,76%	7,23%	7,58%	25,97%	25,47%
3	7,51%	7,87%	11,07%	19,18%	54,38%

7. Realizando una comparativa global, un 28.74% de las áreas analizadas en la totalidad de la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero están altamente corroídas, el 17.77% están mayormente afectadas por la corrosión, ocupadas por grietas y picaduras se encuentran el 9.78% de las mismas, comienza a incidir la corrosión en el 8.72% y se mantienen libres de corrosión el 34.97%. Lo que muestra un resultado final del 65.03% de las áreas con indicios, ya sean leves o graves, de corrosión.

8. La Zona 3 destaca por ser la más afectada por la corrosión, realizando una comparativa general, el 92,49% de las áreas analizados presentan corrosión, desde corrosión incipiente hasta trozos de estructura totalmente corroída. Mucho más elevado este dato que el 66,24% de las áreas de la Zona 2, valor extremadamente elevado también. En la Zona 1, se aprecia corrosión en un 36,33% de las áreas estudiadas.

9. A modo de resumen, del 100% de la corrosión detectada, el 47,42% se encuentra en la Zona 1, por el 33,96% de la Zona 2 y el 18,62% de la Zona 1.

10. La Lógica Difusa o Método *Fuzzy* proporciona resultados que la Lógica Clásica no percibe. A partir de los datos obtenidos mediante el análisis de imágenes,

aplicando el Método *Fuzzy*, se obtienen gráficas distintivas que aportan datos realmente valiosos para el análisis de la corrosión, fenómeno en el cual los múltiples factores incidentes se comportan de formas muy distintas. Al mismo tiempo, los resultados adquiridos tras aplicar la Lógica Difusa comparten grandes similitudes con los obtenidos tras el análisis de imágenes, permitiendo esto verificar la correcta aplicación de ambos métodos.

11. Una vez aplicados los tres pasos esenciales, inspección visual, análisis fotográfico y Lógica Fuzzy, los resultados obtenidos son las variables de salida, que muestran los grados de corrosión y confirman los presagios iniciales. Los valores del grado de corrosión extraídos de Matlab son los que se muestran en la Tabla 33, siendo **0.5** el valor de la Zona 1, un grado de corrosión **medio (M)**, esta es la Zona menormente afectada por la corrosión, **0.75** para la Zona 2, grado de corrosión **alto (A)**, y **0.795** en la Zona 3, donde ya aparece un grado de corrosión **muy alto (MA)**.

Tabla 33. Resultados finales del grado de corrosión en las tres zonas identificados (Elaboración propia)

RESULTADOS FINALES GRADO DE CORROSIÓN	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
	0,5	0,75	**0,795**

Estos valores del grado de corrosión obtenidos, superiores o iguales a 0,5 en las tres zonas críticas, reflejan la alta incidencia de este fenómeno a lo largo de toda la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero.

12. Se observa una gran necesidad de establecer procedimientos de mantenimiento correctos para evitar la pérdida y rotura de la totalidad de la barandilla en la mayor brevedad posible; en caso contrario, los destrozos comenzarán a ser irreversibles. Como ya ha sucedido en la Zona 3, ensenada del Sardinero, entre los meses de septiembre 2020 y abril 2021, del estado de la barandilla era el que se muestra en la Figura 143, es decir, no ha habido barandilla.

Figura 143. Estado de la Zona 3, pérdida total del material (Elaboración propia)

Tras describir las conclusiones obtenidas, se recogen en el siguiente Capítulo la Planificación y el Presupuesto del mismo, desarrollado desde el punto de vista de la realización de un estudio de corrosión por parte de un Ingeniero Industrial.

6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

6.1.- Planificación

La correcta planificación de un proyecto es un paso muy importante para lograr el objetivo final, puesto que, durante este proceso, se expone lo que se va a hacer y cómo ha de llevarse a cabo. Estableciendo unos pasos planificados evitamos, en muchas ocasiones, la improvisación, razón de fracaso en muchos propósitos.

Este Trabajo Fin de Máster, enfocado en el Estudio de La Corrosión en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, Santander, está compuesto por las siguientes tareas, recogidas en la Tabla 32. Se expone una duración aproximada, lo más real posible, de cada tarea, así como las dependencias ente ellas, y los recursos necesarios, en este caso empleamos un único recurso, bajo la figura de Ingeniero Industrial.

Tabla 33. Tareas Proyecto, duración, dependencias y recursos utilizados (Elaboración propia)

TAREA		DURACIÓN (HORAS)	DEPENDENCIAS	RECURSOS
1	Objetivos y planteamiento	5	-	1
2	Recogida de información	30	1	1
3	Inspección visual del entorno	2	2	1
4	Toma de fotografías	5	3	1
5	Análisis de las imágenes	240	4	1
6	Aplicación de la Lógica *Fuzzy*	90	5	1
7	Estudio de los resultados obtenidos	10	6	1
8	Conclusiones	4	7	1
9	Planificación y presupuesto	5	8	1
10	Redacción de la memoria	90	2	1
11	Preparación de la presentación	10	10	1

La base para que todo funcione de manera correcta desde el comienzo de un proyecto, es tener claros los objetivos finales, junto con un correcto planteamiento de las tareas a realizar. La recogida de información es la base de los cimientos, pues antes de empezar

cualquier estudio necesitamos tener una base sólida sobre el tema a desarrollar, en este caso la corrosión.

La inspección visual es uno de los métodos considerados como Ensayos No Destructivos más utilizado, pues ante un planteamiento inicial, se observan los defectos o discontinuidades a simple vista. En estructuras del calibre de la barandilla objeto de estudio se pueden emplear elementos como lupas, lentes de aumento o cintas métricas para llevar a cabo este primer paso.

La toma de fotografías se lleva a cabo tras la inspección visual, para inmediatamente después, proceder a seleccionar las más útiles y comenzar con el análisis fotográfico. Esta tarea se considera la más lenta y costosa del proyecto, requiere de un trabajo especialmente cuidadoso y preciso, pues un fallo en este punto se arrastraría durante todo el desarrollo.

Tras analizar las imágenes, se recogen los datos obtenidos y se trasladan al Software Matlab, para proceder al análisis mediante Lógica Difusa o *Fuzzy Logic*, herramienta principal de este estudio de la corrosión en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero. Los resultados obtenidos tras esta postrema tarea corresponden con el grado final de corrosión, por lo que el Proyecto entra en su fase final: recoger las conclusiones, hacer uso de una planificación ordenada y meditada y elaboración del presupuesto. Por último, se llevará a cabo la presentación de este Trabajo ante el tribunal formado por profesores del Máster de Ingeniero Industrial de la Universidad de Cantabria [104][105], cuyas asignaturas se han combinado con el desarrollo del mismo.

6.2.- Presupuesto

En este apartado se va a redactar el presupuesto necesario para el correcto desarrollo de este Proyecto. Se trata de un presupuesto relativo tanto a los recursos humanos, materiales, de software, así como a otros recursos (desplazamientos).

Coste de recursos materiales

Se recogen, en la Tabla 35 los recursos materiales utilizados, como son el ordenador y sus componentes, la cámara con la que se toman las fotografías, complemento muy importante para el análisis, la cinta métrica y la libreta utilizada para anotar todos los datos característicos durante el desarrollo del Proyecto.

Tabla 34. Coste de los recursos materiales (Elaboración propia)

Recurso	Unidades	€/ud	Coste (€)
PC Inspiron 27 7000 All-in-One	1	1.149,00 €	1.149,00 €
Ratón Inalámbrico LogiTech	1	9,99 €	9,99 €
Canon PowerShot SX540 HS	1	339,00 €	339,00 €
Monitor - LG 22MK600M-B, 21.5"	1	119,00 €	119,00 €
Cinta métrica Stanley, 5m	1	8,86 €	8,86 €
Amortización de material informático (horas)	491	0,15 €	73,65 €
Libreta A5 tapa dura	1	1,35 €	1,35 €

Coste de recursos humanos

El coste estimado para un ingeniero industrial es de 25,00 €/hora, y teniendo en cuenta su carácter de trabajador único en este proyecto, se obtienen los costes referidos a recursos humanos recogidos en la Tabla 36.

Tabla 35. Coste de los recursos humanos (Elaboración propia)

Categoría	Nº de personas	Nº de horas (h)	Precio unitario (€/h)	Importe total (€)
Ingeniero Industrial	1	491	25,00 €	12.275,00 €

Coste de Software

Para hacer un Proyecto de este calibre, es necesario utilizar softwares de pago, como son el Matlab, que se utiliza tanto para el análisis de las fotografías como para la aplicación de la Lógica Difusa, y el Microsoft Office, recogidos en la Tabla 37.

Tabla 36. Coste de los softwares empleados (Elaboración propia)

Software	Unidades	€/ud	Coste (€)
Office 365 Empresa Premium	1	69,00 €	69,00 €
Licencia Matlab 2018	1	2.000,00 €	2.000,00 €

Otros costes

Dentro de este apartado se recogen los costes de desplazamiento, estos se muestran en la Tabla 38, donde destaca un trayecto de larga distancia, entre las ciudades de Gijón (ciudad de residencia habitual del Ingeniero Industrial que realiza este proyecto, es decir, yo misma) y Santander, con motivo del comienzo de las tareas de pintado de la barandilla objeto

de estudio, durante los meses correspondientes a la pandemia del COVID 19 (Mayo 2020) [88][106].

Tabla 37. Otros costes, desplazamientos (Elaboración propia)

Desplazamientos	Unidades	Km	Precio (€/Km)	Coste (€)
Larga distancia (Gijón-Santander)	1	176	0,35 €	61,60 €
Corta distancia (Santander)	10	14	0,35 €	49,00 €

COSTES TOTALES

El Presupuesto de Ejecución Material (PEM), correspondiente a este proyecto, se recoge a continuación, en la Tabla 39.

Tabla 38. Presupuesto de ejecución material (Elaboración propia)

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	
Concepto	Precio total (€)
Coste mano de obra	12.275,00 €
Coste Software	2.069,00 €
Coste material	1.700,85 €
Otros costes	110,60 €
TOTAL	**16.155,45 €**

Por último, el Presupuesto Total, se muestra en la Tabla 40, y asciende a una cifra de **23.848,68 €**, impuestos incluidos.

Tabla 39. Presupuesto total (Elaboración propia)

PRESUPUESTO TOTAL	
Concepto	Precio total (€)
PEM	16.155,45 €
Gastos generales (16%)	2.584,87 €
Beneficio industrial (6%)	969,33 €
TOTAL (sin IVA)	**19.709,65 €**
IVA	*4.139,03 €*
TOTAL	**23.848,68 €**

Por último, se recogen en el Capítulo 7 las Líneas de Trabajo futuro, las tareas a llevar a cabo tras finalizar el análisis del grado de corrosión.

7. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

El estudio realizado para desarrollar el presente Trabajo Fin de Máster presenta el fenómeno de la corrosión y su problemática en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero, una de las zonas más significativas de la bahía de Santander, mediante la aplicación de la Lógica Difusa o Método *Fuzzy*. Esta tipología de trabajo permite la elaboración de líneas de trabajo futuro.

En primer lugar, este proyecto puede servir de partida a la hora de elaborar un plan de mantenimiento exhaustivo a partir de la estructura actual, aunque cabría destacar la gran dificultad que esto supondría, pues en este caso son muchas las zonas donde predomina la pérdida de material. En la Figura 144 se muestra la situación actual, en marzo de 2021, del tramo final de la barandilla, correspondiente con la Zona 3 de estudio, denominada Ensenada del Sardinero, donde ni siquiera existe estructura, lo que obligaría a instalarla nueva y no daría pie a la realización de un mantenimiento, muchos tramos han desaparecido tras los envites del mar. Sería necesario en este tramo poner una nueva barandilla, haciendo hincapié en la correcta selección del material, el tipo de recubrimiento, su inspección y mantenimiento continuo, sino se volvería al estado actual en un tiempo breve.

Figura 144. Estado actual de la Zona 3, ensenada del Sardinero (Elaboración propia)

Otra posible línea de trabajo futuro, a priori más factible que la anterior, es el desarrollo de un proyecto de sustitución de la barandilla, con su consiguiente mantenimiento. Esto consistiría en la redacción de una memoria técnica donde se incluyan los agentes que propician el fenómeno corrosivo, los antecedentes en el entorno, la situación actual, el objeto; renovación de la barandilla, los componentes de esta, la descripción de los trabajos (demoliciones, reparaciones, etc.), el plazo de ejecución, el plazo de garantía y por supuesto, el presupuesto de las obras. Además, el proyecto lo integrarían los planos y pliegos de condiciones, junto con anexos que incluyan un reportaje fotográfico, cálculos dimensionales, gestión de residuos, estudio básico de seguridad y salud, planificación de obras y control de calidad.

Por último, podrían emplearse los resultados obtenidos en este estudio para comparar con otras zonas similares, tanto de la ciudad de Santander, como de cualquier entorno costero, dentro del territorio nacional. Así se podría comprobar la variación de los resultados según las distintas características ambientales de cada lugar. Por ejemplo, comparar los resultados obtenidos en este trabajo correspondiente con la Segunda Playa del Sardinero, en Santander, cuya orientación este lo diferencia de la Playa de San Lorenzo, en Gijón [107], donde predomina una orientación norte.

En la Figura 145 se muestra un esquema que recoge las diferentes líneas de trabajo futuro propuestas.

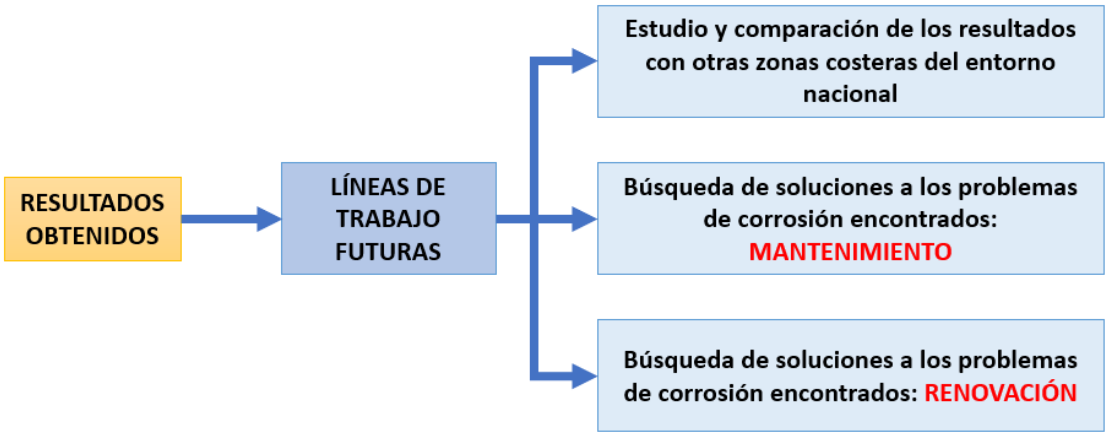


Figura 145. Líneas de trabajo futuras (Elaboración propia)

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] F. C. Gómez de León Hijes y D. J. Alcaraz Lorente, *Manual básico de corrosión para ingenieros*, 1ª Edición. Murcia: Universidad de Murcia. Servicio de publicaciones, 2004.

[2] «Corrosión», *Real Academia Española*. https://dle.rae.es/corrosión (accedido mar. 25, 2020).

[3] J. Ávila y J. Genescá, *Más allá de la herrumbre. La corrosión en la vida diaria*, Primera Ed. México.

[4] H. Otero, «Corrosión, costes y soluciones | Instituto Asteco», *2017*. https://institutoasteco.com/asteco/conoce-el-costo-de-la-corrosion-y-las-soluciones-de-loctite/ (accedido mar. 25, 2020).

[5] L. Bilurbina, F. Liesa Mestres, y J. I. Iribarren Laco, *Corrosión y protección*, Primera Ed. Barcelona: Edicions UPC, 2003.

[6] A. Castañeda, F. Corvo, D. Fernández, y C. Valdés, «Outdoor-Indoor Atmospheric Corrosion in a Coastal Wind Farm Located in a Tropical Island», *Eng. J.*, vol. 21, n.º 2, pp. 43-62, 2017, doi: 10.4186/ej.2017.21.2.43.

[7] I. Bertuccio y M. V. Biezma Moraleda, «Risk assessment of corrosion in oil and gas pipelines using fuzzy logic», *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 47, n.º 7, pp. 553-558, 2012, doi: 10.1179/1743278212Y.0000000028.

[8] M. V. Biezma, D. Agudo, y G. Barron, «A Fuzzy Logic method: Predicting pipeline external corrosion rate», *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 163, n.º May, pp. 55-62, 2018, doi: 10.1016/j.ijpvp.2018.05.001.

[9] G. Tejada Muñoz, «Tutorial de Lógica Fuzzy». [En línea]. Disponible en: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/Ag%0Aosto_2000/pdf/logica fuzzy.pdf.

[10] J.R. Davis, *Corrosion: Understanding the Basics*. ASM International, 2000.

[11] F. J. Pancorbo Floristán, *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Barcelona: Marcombo S.A. 2011, 2010.

[12] M. V. Biezma y P. Linhardt, «¿Por qué no se presta suficiente atención a la corrosión? Why do we still not pay sufficient attention to corrosion?», n.º September, 2020.

[13] M. E. Edward Ghali, V. S. Sastri, *Corrosion Prevention and Protection: Practical Solutions*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

[14] C. Berlanga, M. V. Biezma, y J. Fernández, «Revisión y estado del arte de la corrosividad del etanol y sus mezclas con gasolina», *Rev. Metal.*, vol. 47, n.º 6, pp. 507-518, 2011, doi: 10.3989/revmetalmadrid.1016.

[15] M.G. Fontana, *Corrosion engineering*, 2nd Revise. Mc Graw Hill, 1986.

[16] M. M. B. Chico, D. de la Fuente, J. Simancas, «Corrosión atmosférica de metales. Efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación», *Cent. Nac. Investig. Met.*, pp. 1-16, 2005.

[17] «The Cost of Corrosion - Zerust Excor Corrosion Solutions», Accedido: jul. 02, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.zerust.com/blog/2019/10/02/the-cost-of-corrosion/.

[18] NACE International, «The Global Cost and Impact of Corrosion», Accedido: jul. 02, 2020. [En línea]. Disponible en: https://inspectioneering.com/news/2016-03-08/5202/nace-study-estimates-global-cost-of-corrosion-at-25-trillion-ann.

[19] M. V. Biezma y J. R. San Cristóbal, «Methodology to study cost of corrosion», *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 40, n.º 4, pp. 344-352, 2005, doi: 10.1179/174327805X75821.

[20] «4. La corrosión en la industria». Accedido: jul. 02, 2020. [En línea]. Disponible en: http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4912/html/4_la_corrosin_en_la_industria.html.

[21] Philippe Marcus, *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, Third Edition*, Third Edit. CRC Press, 2017.

[22] N. Dharuman, M. Arulmozhi, M. S. Babu, L. J. Berchmans, y G. Sreedhar, «Investigations on oxidation, hot corrosion and thermal gradient performance of low k-La2Mo2O9 thermal barrier coating», *Bull. Mater. Sci.*, vol. 44, n.º 1, dic. 2021, doi: 10.1007/s12034-020-02279-0.

[23] Y. Wang, X. Mu, J. Dong, A. J. Umoh, y W. Ke, «Insight into atmospheric corrosion evolution of mild steel in a simulated coastal atmosphere», *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 76, pp. 41-50, jun. 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2020.11.021.

[24] «Corrosión y procesos de corrosión | Metalografía – Universidad Tecnológica de Pereira». http://blog.utp.edu.co/metalografia/12-corrosion-y-procesos-de-corrosion/ (accedido may 03, 2020).

[25] T. Vii y M. Lecci, «TEMA VII Deterioro de Materiales Oxidación y Corrosión», pp.

1-34.

[26] U.S Naval Academy, «Chapter 5- Corrosion Types. Naval Materials Science and Engineering Course Notes, U.S. Naval Academy».

[27] «Corrosión galvánica en refrigeración líquida: qué es y como evitarla». https://hardzone.es/tutoriales/montaje/corrosion-galvanica-refrigeracion-liquida-pc/ (accedido jul. 05, 2020).

[28] C. Torre Agüera, «Comparative analysis of the corrosion's degree: Case of Study: "Juan José Arenas" bridge, Santander, Cantabria», Universidad de Cantabria, 2015.

[29] «Crevice Corrosion». https://cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_crevice.htm (accedido mar. 16, 2021).

[30] A. Prieto Alba, «Trabajo Fin de Carrera Corrosión por picadura : Caso particular de estudio del " Puente Juan José Arenas " de Santander», Universidad de Cantabria, 2014.

[31] AENOR, «UNE-EN ISO 11463:2009 Corrosión de metales y aleaciones. Evaluación de la corrosión por picaduras. (ISO 11463:1995)». 2009.

[32] F. Mansfeld, *Corrosion Mechanisms*, First Edit. Los Angeles, California: Marcel Dekker, Inc., 1987.

[33] AENOR, «UNE-EN ISO 8044:2015 Corrosión de metales y aleaciones. Términos principales y definiciones. (ISO 8044:2015).» 2015.

[34] G. A. Farotade, P. A. I. Popoola, y O. M. Popoola, «Computatonal Analysis of System and Design Parameters of Electrodeposition for Marine Applications», *Appl. Stud. Coast. Mar. Environ.*, n.º April 2017, 2016, doi: 10.5772/62376.

[35] S. Lin, W. Bao, J. Gao, y J. Wang, «Intergranular corrosion of austenitic stainless steel», en *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 229-231, pp. 14-17, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.14.

[36] D. N. Wasnik, V. Kain, I. Samajdar, B. Verlinden, y P. K. De, «Controlling grain boundary energy to make austenitic stainless steels resistant to intergranular stress corrosion cracking», *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 12, n.º 4, pp. 402-407, ago. 2003, doi: 10.1361/105994903770342926.

[37] Á. Forero Mora, «Corrosión intergranular en aceros inoxidables», *Ing. e Investig.*, vol. 0, n.º 2, pp. 20-24, 1982.

[38] M. Marçal Castells, «Desarrollo de un software para el cálculo de la pérdida de

potencia de un buque en función del aumento de la corrosión en su casco», Escuela Técnica Superior de Ingenieria Naval y Oceanica, Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.

[39] Q. N. Song *et al.*, «Corrosion and cavitation erosion behaviors of two marine propeller materials in clean and sulfide-polluted 3.5%NaCl solutions», *Acta Metall. Sin. (English Lett.*, vol. 30, n.º 8, pp. 712-720, ago. 2017, doi: 10.1007/s40195-017-0602-7.

[40] «MAB and NAB alloys : Total Materia Article», 2015.

[41] I. Credit y J. F. Parsons, «Stress Corrosion Cracking - Metallic Corrosion Stress Corrosion Cracking (SCC) Defined», pp. 1-4, 2020.

[42] R. N. Salzman y D. Gandy, «Corrosion-fatigue in steam turbine blades CORROSION-FATIGUE IN STEAM TURBINE BLADES STI Technologies , Simutech Group 1800 Brighton-Henrietta Townline Rd B . Schönbauer University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU) National Physical L», n.º May 2019, 2011.

[43] D. Duque y G. Marchena, «Corrosión bajo tensión». Accedido: abr. 12, 2020. [En línea]. Disponible en: https://es.slideshare.net/Gozsgi/corrosin-bajo-tensin.

[44] R. Pelloux y J. M. Genkin, «Corrosion Fatigue», *Fatigue Mater. Struct. Fundam.*, pp. 377-399, 2013, doi: 10.1002/9781118623435.ch10.

[45] A. Castellano y D. Vargas, «Corrosión por fatiga». [En línea]. Disponible en: http://www.cimsaww.com/internet/es/cupropedia/la_corrosi_n/corrosi_n_por_fatiga/corrosion_por_fatiga_1.jsp.

[46] T. R. Reid, «Flexible Operations Impact on Steam Turbine Failure Modes and Best Practices», n.º 302, 2018.

[47] B. Chico, E. Otero, L. Mariaca, y M. Morcillo, «La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa», *Rev. Metal.*, vol. 34, n.º EXTRA, pp. 71-74, 1998, doi: 10.3989/revmetalm.1998.v34.iExtra.711.

[48] S. Abdul-wahab y C. Bakheit, «Atmospheric Corrosion Of Metals», n.º January 1968, 2014.

[49] UNE, «UNE-EN ISO 12944-1. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 1: Introducción general», 2017.

[50] «ISO - ISO 9223:2012 - Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres

— Classification, determination and estimation». Accedido: jul. 08, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/53499.html.

[51] BERNARDO ECENARRO S.A., «USO Y APLICACIÓN, 01 NORMA UNE EN ISO 12944 Clasificación de ambientes». Accedido: mar. 19, 2021. [En línea]. Disponible en: www.besa.es.

[52] P. Linhardt, «Corrosion of metals in natural waters influenced by manganese oxidizing microorganisms», *Biodegradation*, vol. 8, n.º 3, pp. 201-210, 1997, doi: 10.1023/A:1008294003160.

[53] R. Rodíguez Fernández, «Gestión Medioambiental Tema 2».

[54] AENOR, «UNE-EN ISO 12944-1. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 1: Introducción general», 2017.

[55] T. Moscol-Sandoval, «Mejoras Para La Protección Anticorrosiva En La Zona Splash De Los Pilotes En El Muelle Del Terminal Bayóvar», 2013.

[56] D. Agudo Saiz, «La importancia del diseó en la corrosión de los materiales: Caso particular de la pasarela de la ETSIIT, Universidad de Cantabria», Univerisy of Cantabria, 2017.

[57] S. M. Restrepo-Arcila, A. I. Echavarría-Velásquez, H. D. S. Londoño, y M. A. Giraldo-Cadavid, «Study of the influence of cobalt in the high formability of the Au-Fe system», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 2018, n.º 89, pp. 9-15, 2018, doi: 10.17533/udea.redin.n89a02.

[58] «Recubrimiento de superficies por plasma». https://plasma-procesos.com/index.php/es/tecnologia-plasma/recubrimiento-superficies-por-plasma (accedido mar. 19, 2021).

[59] «Recubrimiento por plasma | Thierry Corporation». https://www.thierry-corp.com/es-mx/tecnologia-de-plasma/aplicaciones/recubrimiento-por-plasma (accedido mar. 19, 2021).

[60] D. Pérez-Muñoz, J. L. Marulanda-Arévalo, y C. M. Moreno-Tellez, «Corrosion protection in saline environment of a carbon steel coated (aluminum & three-layer painting system) by eats», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 2018, n.º 89, pp. 9-16, 2018, doi: 10.17533/udea.redin.n89a04.

[61] Hempel, «¿Cómo seleccionar el sistema de pintura adecuado? Directrices según Norma ISO 12944».

[62] UNE, «NORMA EN ISO 8501 Protección anticorrosiva de estructuras de acero mediante pintura», 2011.

[63] U.-E. ISO, «Pinturas y barnices Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pinturas protectores Parte6: Ensayos de comportamiento en laboratorio», 1999.

[64] «Pinturas antifouling para barcos - Cosas de Barcos». https://www.cosasdebarcos.com/blog/consejos/mantenimiento-del-casco-antifouling/ (accedido mar. 19, 2021).

[65] «Hispanamer - Fábrica de pinturas industriales y decorativas - Introducción a la pintura». https://www.hispanamer.es/index.php/tecnologia/apendice-tecnico/introduccion-a-la-pintura (accedido may 27, 2020).

[66] «Contra la Corrosión: Algo Más de Teoría». https://quimicasthai.wordpress.com/2010/01/21/contra-la-corrosion-algo-mas-de-teoria/ (accedido may 27, 2020).

[67] «Hispanamer - Fábrica de pinturas industriales y decorativas - Sistema de aplicación». https://www.hispanamer.es/index.php/tecnologia/apendice-tecnico/sistema-de-aplicacion (accedido may 27, 2020).

[68] «Pintura CAMALEON | Pinturas Sanz». http://pinturasanz.com/efectos/pintura-camaleon (accedido may 27, 2020).

[69] AENOR, «UNE-EN ISO 4628-:2016 Evaluación del grado de descamación», 2016.

[70] AENOR, «UNE-EN ISO 4628-2:2016 Evaluación del grado de ampollamiento», 2016.

[71] AENOR, «UNE-EN ISO 4628-3:2016 Evaluación del grado de oxidación», 2016.

[72] AENOR, «UNE-EN ISO 4628-4:2016 Evaluación del grado de agrietamiento», 2016.

[73] J. Cantero Cuesta, «Diseño y modelización de un mapa de corrosión en los polígonos industriales de Cantabria, España», Universidad de Cantabria, 2016.

[74] I. Cobo, M. V. Biezma, y L. Sánchez, «Estudio microestructural de bronces de aluminio y níquel (NAB) y bronces de aluminio y manganeso (MAB): Efecto de dos reactivos químicos.», vol. 1, n.º 3, pp. 59-62, 2017.

[75] Costa.J.M, «El deterioro de los materiales en la atmósfera», Barcelona, 1989.

[76] C. González Morcillo, «Lógica difusa. Una introducción práctica. Técnicas de Softcomputing», 2015.

[77] D. Negri *et al.*, «Introducción al razonamiento aproximado : lógica difusa», *Rev.*

Argentina Med. Respir., vol. 4, p. 136, 2006.

[78] «Remembering Lotfi Zadeh, the Inventor of Fuzzy Logic | The New Yorker».

[79] N. Ghorui *et al.*, «Identification of dominant risk factor involved in spread of COVID-19 using hesitant fuzzy MCDM methodology», *Results Phys.*, vol. 21, p. 103811, feb. 2021, doi: 10.1016/j.rinp.2020.103811.

[80] W. M. Shaban, A. H. Rabie, A. I. Saleh, y M. A. Abo-Elsoud, «Detecting COVID-19 patients based on fuzzy inference engine and Deep Neural Network», *Appl. Soft Comput.*, vol. 99, p. 106906, feb. 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106906.

[81] Y. Broche-Pérez, L. F. Herrera Jiménez, y E. Omar-Martínez, «Neural substrates of decision-making», *Neurologia*, vol. 31, n.º 5, pp. 319-325, jun. 2016, doi: 10.1016/j.nrl.2015.03.001.

[82] M. E. Cosenza-Andraus, C. A. Nunes-Cosenza, R. Gomes-Nunes, C. Fantezia-Andraus, y S. V. Alves-Leon, «Video-electroencephalography prolonged monitoring in patients with ambulatory diagnosis of medically refractory temporal lobe epilepsy: Application of fuzzy logic's model», *Rev. Neurol.*, vol. 43, n.º 1, pp. 7-14, 2006, doi: 10.33588/rn.4301.2005615.

[83] M. A. Lubiano, P. González-Gil, H. Sánchez-Pastor, C. Pradas, y H. Arnillas, «An incipient fuzzy logic-based analysis of the medical specialty influence on the perception about mental patients», Oviedo, 2018.

[84] R. Pérez Pueyo, «Descripción general de las técnicas de lógica difusa. Capítulo 2 : Conceptos fundamentales», pp. 35-59.

[85] «Google Earth». https://www.google.com/intl/es/earth/ (accedido jun. 04, 2020).

[86] JN Aceros, «¿El acero al carbono es mejor que el acero inoxidable?», 2019.

[87] «hempaquick-enamel-53840 | Hempel.es». https://www.hempel.es/es-ES/products/hempaquick-enamel-53840 (accedido jun. 24, 2020).

[88] «A Timeline of COVID-19 Developments in 2020».

[89] Ana Rosa García, «Cantabria pasa a la fase 1 de la "desescalada" | El Diario Montañes», Santander, may 09, 2020.

[90] «Higroscópico - Quimipedia». https://www.vadequimica.com/quimipedia/h/higroscopico/ (accedido mar. 23, 2021).

[91] C. F. Ibáñez, «La alteración del hierro por sales: ayer y hoy; problemas y soluciones», *Monte Buciero*, vol. 9, pp. 278-302, 2003, [En línea]. Disponible en: http://dialnet.unirioja.es/servlet/dcfichero_articulo?codigo=759271.

[92] S. Garcia Morales, «Metodología de diagnóstico de humedades de capilaridad ascendente y condensación higroscópica, en edificios históricos.», Escuela Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, 1995.

[93] E. Laorden, «Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesado digital de imágenes de MATLAB», 2012.

[94] «Descripción del producto MATLAB - MATLAB & Simulink - MathWorks España». https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html (accedido jun. 08, 2020).

[95] «MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink». https://es.mathworks.com/?s_tid=gn_logo (accedido jun. 08, 2020).

[96] «Imagen digital – Conceptos básicos – El futuro está en tus manos». https://valentingom.wordpress.com/2016/12/26/imagen-digital-conceptos-basicos/ (accedido jun. 12, 2020).

[97] G. Molinero Díez, «Segmentación De Imágenes En Color Basada En El Crecimiento De Regiones», *Etsi*, n.º Ingeniería de telecomunicación, pp. 5-10, 2010.

[98] «Espectro visible de la luz que puede percibir el ojo humano Fuente:... | Download Scientific Diagram». https://www.researchgate.net/figure/Figura-03-Espectro-visible-de-la-luz-que-puede-percibir-el-ojo-humano-Fuente-Vanrell_fig2_333717805 (accedido jun. 12, 2020).

[99] Antonio Herrera, «Modelos de color (RGB, CMYK, HSV/HSL)». Accedido: jul. 02, 2020. [En línea]. Disponible en: https://ahenav.com/2014/04/09/modelos-de-color/.

[100] Universidad de Palermo, «¿Que es el color Luz?» [En línea]. Disponible en: http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/35500_127050.pdf.

[101] N. L. Fernández García, «Introducción a la visión artificial», 2005. [En línea]. Disponible en: www.freelibros.me.

[102] «Array de caracteres - MATLAB - MathWorks España». https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/char.html (accedido jul. 13, 2020).

[103] «Gráfico de superficie - MATLAB surf - MathWorks España». https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/surf.html (accedido jun. 21, 2020).

[104] «ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación Máster Universitario en Ingeniería Industrial». https://web.unican.es/centros/etsiit/estudios-de-master/master-universitario-en-ingenieria-industrial (accedido abr. 09, 2021).

[105] «Universidad de Cantabria Inicio». https://web.unican.es/ (accedido abr. 09, 2021).

[106] «COVID-19: cronología de la actuación de la OMS». https://www.who.int/es/news/item/27-04-2020-who-timeline---covid-19 (accedido abr. 09, 2021).

[107] «Playa de San Lorenzo. Gijón / Asturias / Playas / Guías / Portada - masmar». https://guias.masmar.net/index.php/Playas/Asturias/Playa-de-San-Lorenzo.-Gijón (accedido abr. 09, 2021).

ANEXO I ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURAS

Figura 1. Localización barandilla objeto de estudio (Segunda Playa del Sardinero) 9
Figura 2. Zonas clave de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)..... 11
Figura 3. Zona 1: Zona Parque Mesones (Elaboración propia)..... 12
Figura 4. Zona 2: Recta Avenida Manuel García Lago (Elaboración propia) 12
Figura 5. Zona 3: Ensenada de El Sardinero (Elaboración propia)..... 12
Figura 6. Barandilla Segunda Playa del Sardinero, tramo correspondiente a la Zona 2 (Elaboración propia)..... 13
Figura 7. Desgaste por corrosión de la barandilla (Elaboración propia)..... 13
Figura 8. Etapas método de *Fuzzy* (Elaboración propia)..... 14
Figura 9. Flujograma resumen Capítulo 1 (Elaboración propia)..... 16
Figura 10. PIB destinado a la corrosión en diferentes partes del mundo [17]..... 20
Figura 11. Efectos perjudiciales de la corrosión (Elaboración propia) 21
Figura 12. Celda electroquímica generadora de corriente eléctrica (Elaboración propia) .. 22
Figura 13. Formas de corrosión, clasificación según Mars. G. Fontana (Elaboración propia) 27
Figura 14. Ejemplos de corrosión por ataque uniforme (Elaboración propia)..... 28
Figura 15. Presencia de corrosión galvánica en una pieza de aluminio [27]..... 30
Figura 16. Corrosión por resquicio en una brida de acero inoxidable expuesta a un medio rico en cloruros [29] 31
Figura 17. Forma de las picaduras a partir de un corte transversal [31]..... 32
Figura 18. Corrosión por picadura en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)..... 33
Figura 19. Presencia de picaduras en la superficie de un acero inoxidable AISI 304 [15] . 34
Figura 20. Corrosión intergranular [34] 35
Figura 21. Corrosión selectiva uniforme (1) y localizada (2) [15]..... 36
Figura 22. Corrosión por erosión [25]..... 37
Figura 23. Hélice corroída por cavitación [25]..... 37
Figura 24. Esquema SCC [41]..... 38
Figura 25. Corrosión fatiga en la pala de una turbina [46]..... 40

Figura 26. Corrosión de Fe en aire con 0.01% SO_2 [5] 41
Figura 27. Aspecto unión mediante soldadura correspondiente a la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia) 47
Figura 28. Diagrama de flujo diseño componente estructural y protección frente a la corrosión [12] 50
Figura 29. Campo de aplicación Normas ISO 12944 (Elaboración propia) 53
Figura 30. Grados de oxidación recogidos en la Norma ISO 8501 (Elaboración propia) 54
Figura 31. Clasificación de las pinturas en función de su forma de secado (Elaboración propia) 55
Figura 32. Clasificación de las pinturas según su función (Elaboración propia) 56
Figura 33. Clasificación de las pinturas en función de la naturaleza del ligando (Elaboración propia) 56
Figura 34. Capas de pintura a aplicar en los metales [66] 58
Figura 35. Métodos de aplicación de pinturas (Elaboración propia) 59
Figura 36. Ficha técnica pintura [68] 61
Figura 37. Muestra ampollamiento en superficie [70] 62
Figura 38. Ejemplo grado de oxidación Ri5 [71] 63
Figura 39. Agrietamiento Cantidad (densidad 5) [72] 64
Figura 40. Descamación sin dirección preferente cantidad (densidad) 5 [69] 65
Figura 41. Barandilla afectada por la salinidad del agua del mar (Elaboración propia) 68
Figura 42. Mapa isocorrosión España [75] 69
Figura 43. Lofty A. Zadeh, Lógica Difusa [78] 70
Figura 44. Conjunto tradicional (a), Conjunto *Fuzzy* (b) [9] 72
Figura 45. Lógica Difusa versus Lógica Clásica [84] 73
Figura 46. Funciones características habituales en lógica difusa, triangular (a), trapezoidal (b), gaussiana (c) y sigmoidal (d) [84] 74
Figura 47. Etapas Método *Fuzzy* (Elaboración propia) 76
Figura 48. *Fuzzyficación* (Elaboración propia) 77
Figura 49. Descripción Conjunto "persona alta" *Fuzzy* [76] 78
Figura 50. Motor de interferencia (Elaboración propia) 78
Figura 51. *Defuzzyficación* 79

Figura 52. Flujograma que recoge el desarrollo completo del Proyecto (Elaboración propia) 83
Figura 53. Localización España [85] 84
Figura 54. Localización Cantabria [85] 84
Figura 55. Localización Santander [85] 85
Figura 56. Recubrimiento utilizado para proteger la barandilla Segunda Playa del Sardinero [87] 86
Figura 57. Tramo barandilla Zona Parque Mesones 87
Figura 58. Estado de la barandilla de la Zona 1 (Elaboración propia) 87
Figura 59. Tramo barandilla recta Avenida Manuel García Lago 88
Figura 60. Estado de la barandilla a los pocos días de pintarla (Elaboración propia) 89
Figura 61. Desaparición o deterioro de los pernos de fijación en distintos tramos de la barandilla (Elaboración propia) 89
Figura 62. Tramo de barandilla Zona Ensenada del Sardinero (Elaboración propia) 90
Figura 63. Estado del interior de las zonas de unión para la tercera zona crítica (Elaboración propia) 91
Figura 64. Distintas zonas de corrosión en un mismo trozo de barandilla (Elaboración propia) 92
Figura 65. Rotura grave del material con detalle de descamación progresiva de las capas de pintura y los óxidos de hierro (Elaboración propia) 93
Figura 66. Picaduras iniciales (Elaboración propia) 94
Figura 67. Picaduras avanzadas (Elaboración propia) 94
Figura 68. Grietas por corrosión del metal (Elaboración propia) 95
Figura 69. Colapso por picadura (Elaboración propia) 96
Figura 70. Cámara Canon PowerShot SX540 HS empleada en el presente Proyecto 97
Figura 71. Etapas para la adquisición de imágenes de los elementos corroídos (Elaboración propia) 98
Figura 72. Preparación de imágenes, imagen real (Elaboración propia) 100
Figura 73. Preparación de imágenes, detalle (Elaboración propia) 100
Figura 74. Espectro electromagnético [93] 103
Figura 75. Espectro visible [98] 105

Figura 76. Espacio RGB [30] 106
Figura 77. Espacio CMYK [30] 106
Figura 78. Espacio de color HSV [97] 107
Figura 79. Espacio de color L*a*b [96] 108
Figura 80. Saturación del color rojo [100] 110
Figura 81. Imagen original vs Imagen generada por el operador Laplaciano [101] 113
Figura 82. Etapas del procesado de imágenes con sus respectivos ejemplos (Elaboración propia)..... 114
Figura 83. Espacios de color en el entorno de Matlab (Elaboración propia) 115
Figura 84. Espacio HSV, aplicación Color Thresholder Matlab (Elaboración propia)..... 115
Figura 85. Segmentación de la corrosión, aplicación *Color Thresholder* Matlab (Elaboración propia)..... 116
Figura 86. Inversión de la imagen (Elaboración propia)..... 117
Figura 87. Imagen binaria (Elaboración propia) 117
Figura 88. Imagen utilizada como ejemplo, dimensiones 150x50 mm (Elaboración propia) 118
Figura 89. Clasificación grados de corrosión para el presente Trabajo Fin de Máster (Elaboración propia)..... 119
Figura 90. Aparición del galvanizado (Elaboración propia) 120
Figura 91. Presencia de burbujas y ampollas en la barandilla, Zona crítica 2 (Elaboración propia)..... 120
Figura 92. Mallado de las imágenes mediante Autocad (Elaboración propia)..... 121
Figura 93. Matriz determinante de la corrosión en la imagen guía de la Figura 92 (Elaboración propia)..... 122
Figura 94. Modelización mediante Matlab de la imagen guía (Elaboración propia) 123
Figura 95. Ejemplo de modelización 3D entre dos imágenes diferentes (Elaboración propia) 123
Figura 96. Área de trabajo Matlab, código creado 124
Figura 97. Variables de entrada y salida de la etapa de Método *Fuzzy* (Elaboración propia) 128

Figura 98. Área máxima totalmente corroída, correspondiente a la Imagen 3.18 del Anexo III (Elaboración propia) 129
Figura 99. Área mínima totalmente corroída, correspondiente a la Imagen 3.1 del Anexo III (Elaboración propia) 130
Figura 100. Área máxima mayormente afectada por la corrosión, correspondiente a la Imagen 2.5 del Anexo III (Elaboración propia) 131
Figura 101. Área mínima mayormente afectada por la corrosión, correspondiente a la Imagen 3.17 del Anexo III (Elaboración propia) 131
Figura 102. Área máxima ocupada por grietas y picaduras, correspondiente a la Imagen 3.19 del Anexo III (Elaboración propia) 132
Figura 103. Área mínima ocupada por grietas y picaduras, correspondiente a la Imagen 1.23 del Anexo III (Elaboración propia) 132
Figura 104. Área máxima de corrosión incipiente correspondiente a la Imagen 2.20 del Anexo III (Elaboración propia), ... 133
Figura 105. Área mínima de corrosión incipiente correspondiente a la Imagen 2.30 del Anexo III (Elaboración propia), ... 133
Figura 106. Área máxima libre de corrosión, correspondiente a la Imagen 1.25 del Anexo III (Elaboración propia) 134
Figura 107. Área mínima libre de corrosión, correspondiente a la Imagen 2.28 del Anexo III (Elaboración propia) 134
Figura 108. Ejemplo cálculo de intervalos para la variable Área de corrosión incipiente de la Zona 1 (Elaboración propia) 135
Figura 109. Pasos seguidos para llegar a los resultados finales, Grado de Corrosión en cada Zona de trabajo (Elaboración propia) 137
Figura 110. Grados de corrosión Zona 1 (Elaboración propia) 140
Figura 111. Dispersión de los distintos grados de corrosión en la Zona 1 (Elaboración propia) 140
Figura 112. Fotografías tomadas en la Zona 2 (Elaboración propia) 141
Figura 113. Grados de corrosión Zona 2 (Elaboración propia) 143
Figura 114. Dispersión de los distintos grados de corrosión en la Zona 2 (Elaboración propia) 143

Figura 115. Fotografías tomadas en la Zona 2 (Elaboración propio) 144
Figura 116. Grados de corrosión Zona 3 (Elaboración propia) 146
Figura 117. Dispersión de los distintos grados de corrosión en la Zona 3 (Elaboración propia) 147
Figura 118. Fotografías representativas de la Zona 3 (Elaboración propia) 147
Figura 119. Representación del área libre de corrosión (Elaboración propia) 149
Figura 120. Representación del Área de corrosión incipiente (Elaboración propia) 149
Figura 121. Representación del Área ocupada por grietas y picaduras (Elaboración propia) 150
Figura 122. Representación del Área mayormente afectada por la corrosión (Elaboración propia) 150
Figura 123. Representación del Área totalmente corroída (Elaboración propia) 151
Figura 124. Motor de interferencia Zona 1 (Elaboración propia) 152
Figura 125. Editor de reglas de la Fuzzy Toolbox de Matlab, Rule Editor (Elaboración propia) 154
Figura 126. Defuzzificación Zona 1 (Elaboración propia) 155
Figura 127. Gráfica Fuzzy para el Área libre de corrosión de la Zona 2 (Elaboración propia) 156
Figura 128. Gráfica Fuzzy para el Área de corrosión incipiente de la Zona 2 (Elaboración propia) 156
Figura 129. Gráfica Fuzzy para el Área de corrosión incipiente de la Zona 2 (Elaboración propia) 157
Figura 130. Gráfica Fuzzy para el Área mayormente afectada por la corrosión de la Zona 2 (Elaboración propia) 158
Figura 131. Gráfica Fuzzy para el Área totalmente corroída de la Zona 2 (Elaboración propia) 158
Figura 132. Motor de interferencia para la Zona 2 de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia) 159
Figura 133. Defuzzificación de la Zona 2 (Elaboración propia) 161
Figura 134. Gráfica Fuzzy para el Área libre de corrosión de la Zona 3 (Elaboración propia) 162

Figura 135.Gráfica Fuzzy para el Área de corrosión incipiente de la Zona 3 (Elaboración propia)..... 163
Figura 136. Gráfica Fuzzy para el Área ocupada por Grietas y Picaduras del de la Zona 3 (Elaboración propia)..... 163
Figura 137. Gráfica Fuzzy para el Área Mayormente afectada por la corrosión de la Zona 3 (Elaboración propia)..... 164
Figura 138. Gráfica Fuzzy para el Área totalmente corroída de la Zona 3 (Elaboración propia)..... 164
Figura 139. Motor de interferencia para la Zona 3 de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia)..... 166
Figura 140. Defuzzificación de la Zona 3 (Elaboración propia)..... 168
Figura 141. Estado de la barandilla de la Zona 3 en marzo de 2021 (Elaboración propia) 171
Figura 142. Estado de la barandilla de la Zona 3 en abril de 2021, reposición de la barandilla (Elaboración propia)..... 172
Figura 143. Estado de la Zona 3, pérdida total del material (Elaboración propia)..... 175
Figura 144. Estado actual de la Zona 3, ensenada del Sardinero (Elaboración propia) 180
Figura 145. Líneas de trabajo futuras (Elaboración propia)..... 181

ANEXO II ÍNDICE DE TABLAS

TABLAS

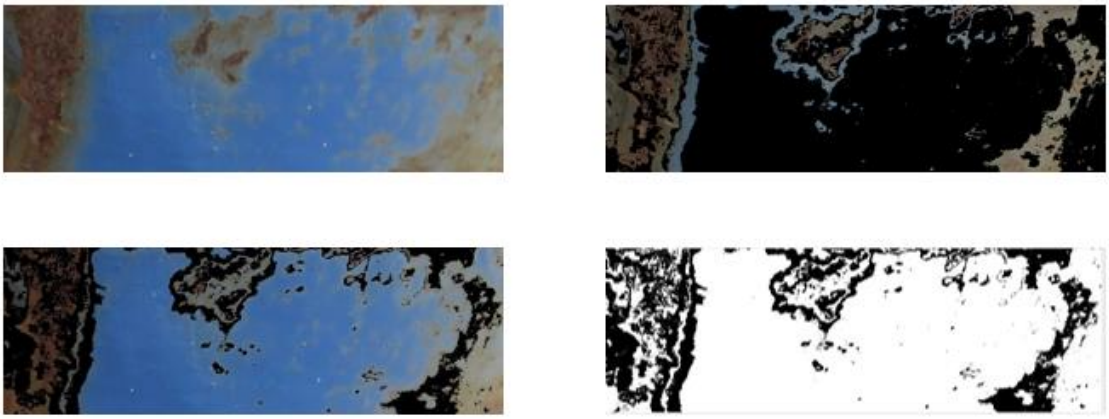
Tabla 1. Factores que afectan al proceso corrosivo [11] 19
Tabla 2. Elementos presentes en las reacciones de reducción y oxidación (Elaboración propia)..... 23
Tabla 3. Serie Electroquímica de los Metales [1]..... 24
Tabla 4. Serie Galvánica (Elaboración propia) 25
Tabla 5. Ejemplos de situaciones en las que los metales y aleaciones sufren corrosión bajo tensión (Elaboración propia) 39
Tabla 6. Categorías de corrosividad atmosférica [51]..... 43
Tabla 7. Categorías para clasificar la corrosión en agua y tierra [26] 44
Tabla 8. Efecto de la preparación de las superficies (Elaboración propia) 52
Tabla 9. Clasificación de la durabilidad en tratamiento orgánicos (Elaboración propia) ... 55
Tabla 10. Tipos de pinturas según la clasificación habitual (Elaboración propia)..... 56
Tabla 11. Grados de oxidación según UNE-EN ISO 4628 (Elaboración propia) 63
Tabla 12. Cantidad y tamaño de las grietas, clasificación UNE-EN ISO 4628-4:2016 (Elaboración propia) 64
Tabla 13. Clasificación del grado de descamación (Elaboración propia) 65
Tabla 14. Parámetros anuales climatológicos Bahía de Santander (Elaboración propia) ... 67
Tabla 15. Hoja de datos para la obtención de las variables a analizar mediante el método *Fuzzy*..... 125
Tabla 16. Motor de interferencia *Fuzzy* (Elaboración propia)..... 135
Tabla 17. Sección del motor de interferencia (Elaboración propia)..... 136
Tabla 18. Datos obtenidos del análisis de imágenes en la Zona 1 (Elaboración propia) .. 139
Tabla 19. Datos obtenidos del análisis de imágenes en la Zona 2 (Elaboración propia) .. 142
Tabla 20. Datos obtenidos del análisis de imágenes en la Zona 3 (Elaboración propia) .. 145
Tabla 21. Valores de las variables de entrada de la Zona 1 (Elaboración propia) 148
Tabla 22. Resultados de la etapa de Fuzzyficación en la Zona 1 (Elaboración propia).... 151
Tabla 23. Reglas IF-THEN Zona 1 (Elaboración propia) 152
Tabla 24. Valores de las variables de entrada de la Zona 2 (Elaboración propia) 155
Tabla 25. Valores de las variables de entrada de la Zona 2 (Elaboración propia) 159

Tabla 26. Reglas IF-THEN Zona 2 (Elaboración propia) 160
Tabla 27. Valores de las variables de entrada en la Zona 3 (Elaboración propia) 162
Tabla 28. Valores de las variables de entrada de la Zona 2 (Elaboración propia) 165
Tabla 29. Reglas IF-THEN correspondientes a la Zona 3 (Elaboración propia) 167
Tabla 30. Distribución de la ocupación de las variables abruptas en cada Zona de estudio (Elaboración propia) 169
Tabla 31. Resultados obtenidos del análisis mediante Matlab (Elaboración propia) 169
Tabla 32. Resultados finales obtenidos del análisis de la corrosión en la barandilla de la Segunda Playa del Sardinero (Elaboración propia) 173
Tabla 33. Resultados finales del grado de corrosión en las tres zonas identificados (Elaboración propia) 174
Tabla 34. Tareas Proyecto, duración, dependencias y recursos utilizados (Elaboración propia) 176
Tabla 35. Coste de los recursos materiales (Elaboración propia) 178
Tabla 36. Coste de los recursos humanos (Elaboración propia) 178
Tabla 37. Coste de los softwares empleados (Elaboración propia) 178
Tabla 38. Otros costes, desplazamientos (Elaboración propia) 179
Tabla 39. Presupuesto de ejecución material (Elaboración propia) 179
Tabla 40. Presupuesto total (Elaboración propia) 179

ANEXO III PROCESADO DE IMÁGENES

ZONA 1

IMAGEN 1.1



A1=

3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2	2	1	1	1	1	2	3	3	2	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
3	3	3	3	2	0	0	0	0	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
3	3	3	3	2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	2	1	1

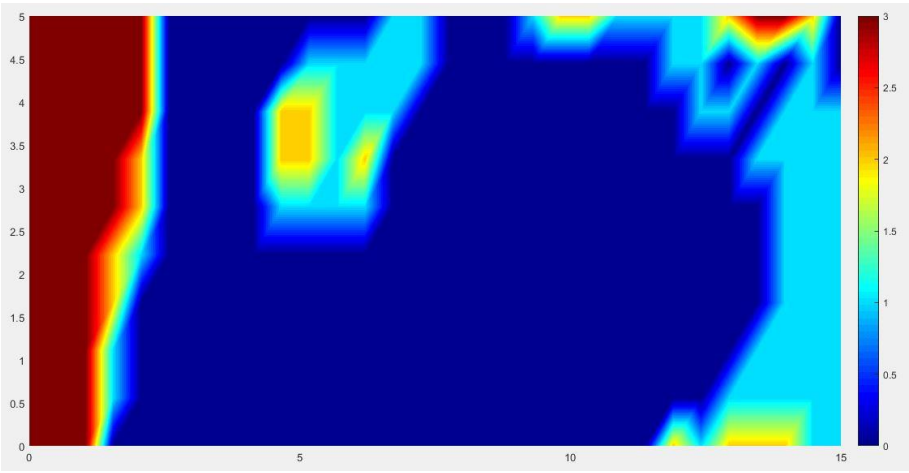
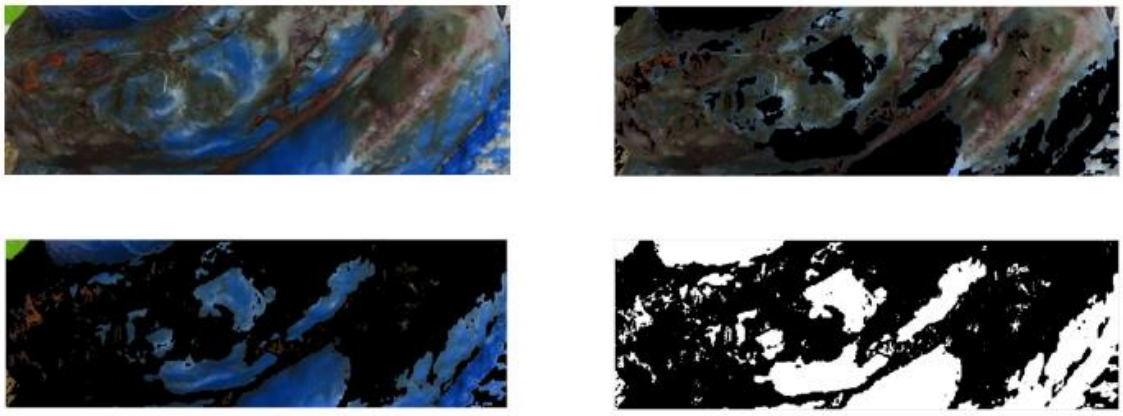


IMAGEN 1.2



A2=

0	2	0	0	0	0	0	1	3	3	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2	2	1	1	2	1	2	3	3	2	1
2	2	1	0	0	3	1	2	3	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	2	0	0	2	1	1	0	1	2	1	1
2	2	1	2	1	2	2	3	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	1	1	1	2	1	1	0
2	3	3	3	2	2	3	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1	1	1	1	0	2	1	2	2	0
2	3	2	1	2	2	3	1	0	1	1	1	1	2	2	3	3	2	2	3	1	2	2	2	2	2	3	3	2	0
2	2	2	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	3	0	0
2	2	2	1	0	2	1	0	0	0	1	0	0	1	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1
2	2	2	1	0	2	1	0	0	0	1	0	1	2	0	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1
1	1	2	1	0	1	1	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	1	1	1	1
1	1	1	0	0	1	1	2	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	1	2	2	2	1	1

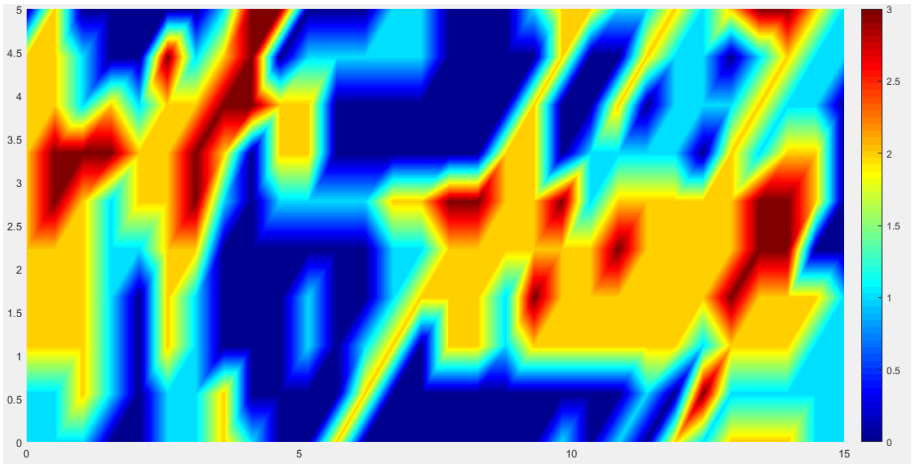
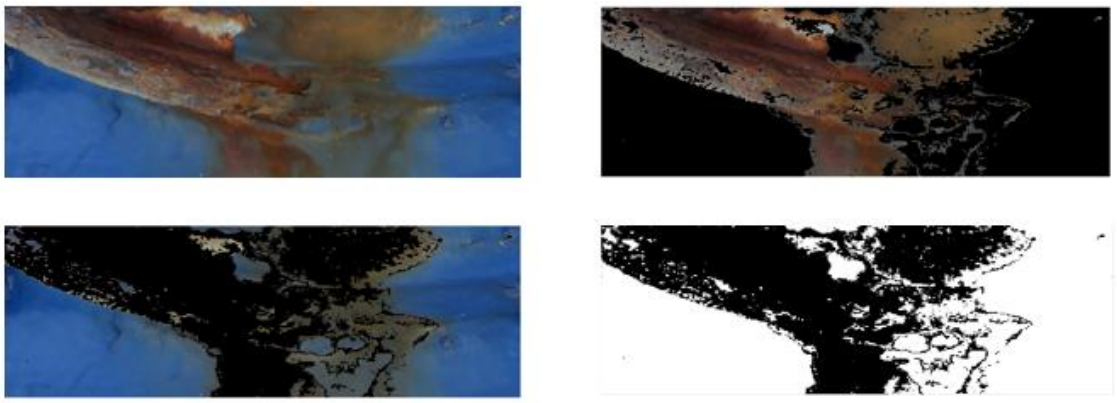


IMAGEN 1.3



A3=

2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	1	1	0	0	0	0	2	2	1	2	1	2	1	2	0	0	0	0
1	0	0	0	0	3	1	2	2	3	3	1	1	1	0	1	0	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
1	1	0	2	1	2	2	3	3	2	2	3	3	0	1	0	0	1	2	0	0	2	0	1	1	1	2	1	1	1
1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	0	1	1	1	1	0	2	0	0	0	0
0	0	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	2	2	3	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	1	1	3	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	2	0	1	2	2	2	2	2	2	1	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	2	1	2	0	0	0	0

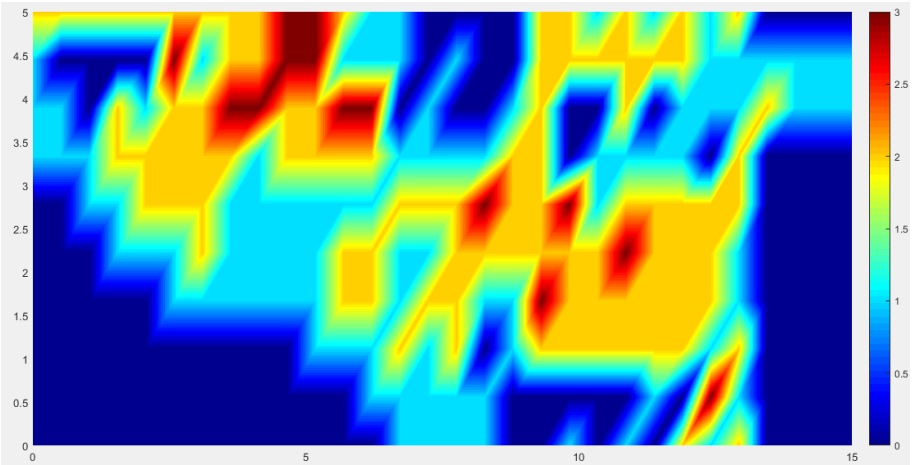
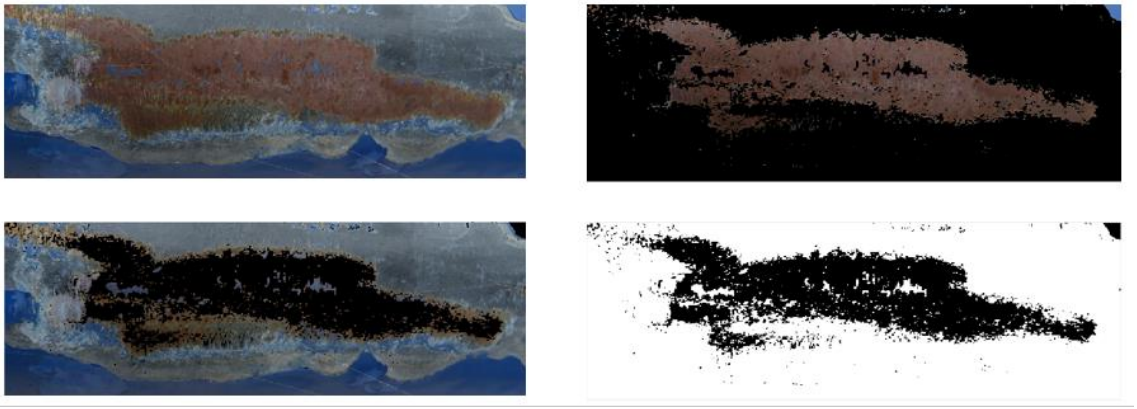


IMAGEN 1.4



A3=

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

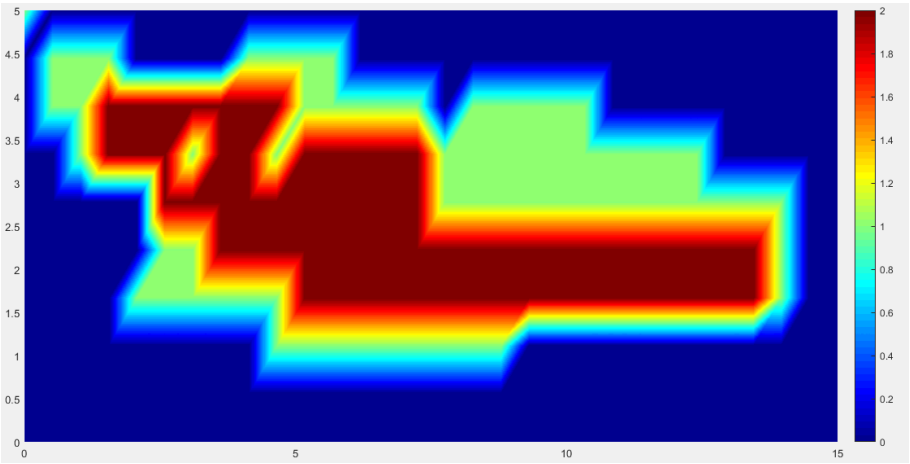
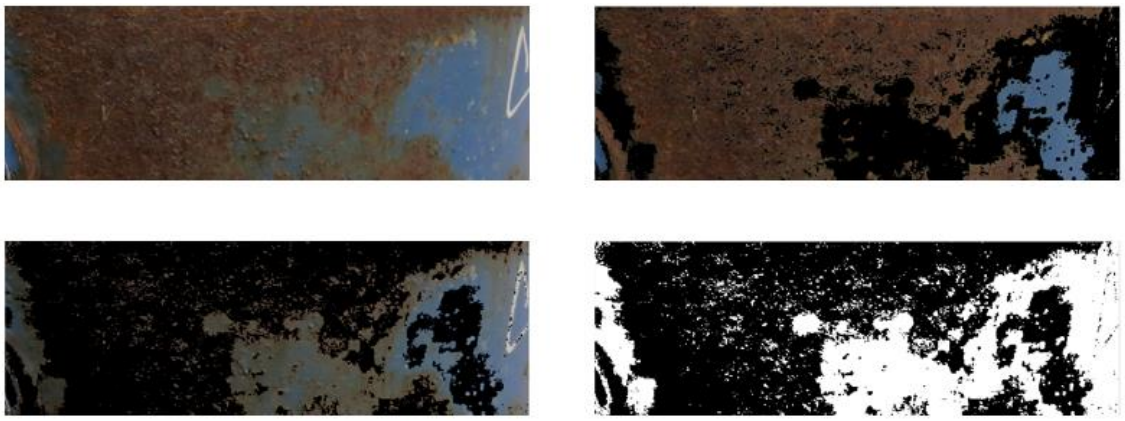


IMAGEN 1.5



A5=

2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	0	0	0
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	0	0	0
1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0
1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	0	0	0
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	0	0	0
3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0
2	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	0
2	2	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	0

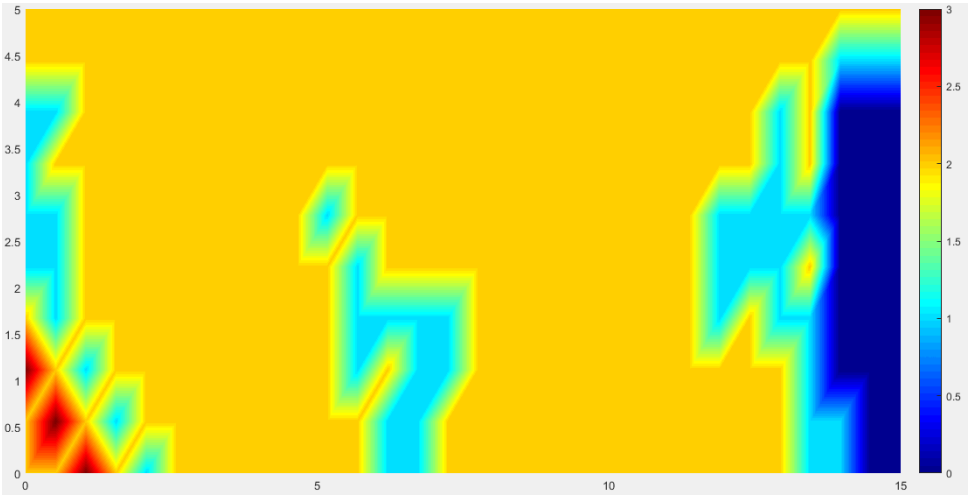
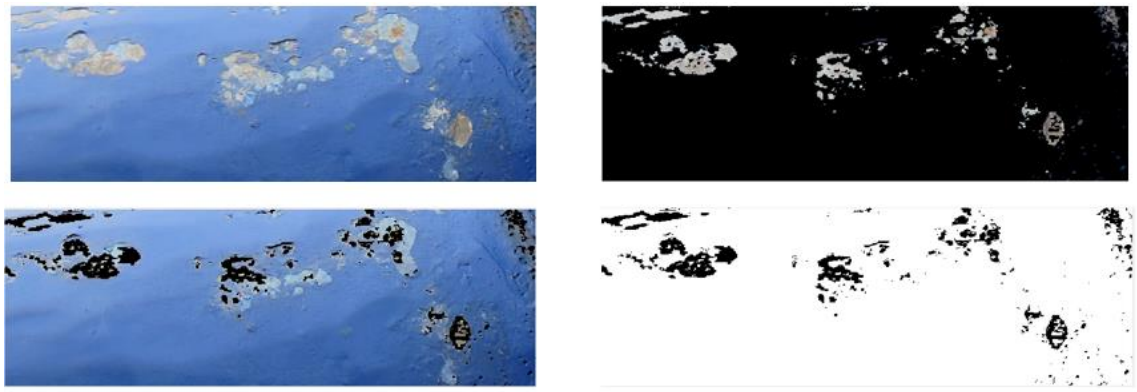


IMAGEN 1.6



A6=

0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	

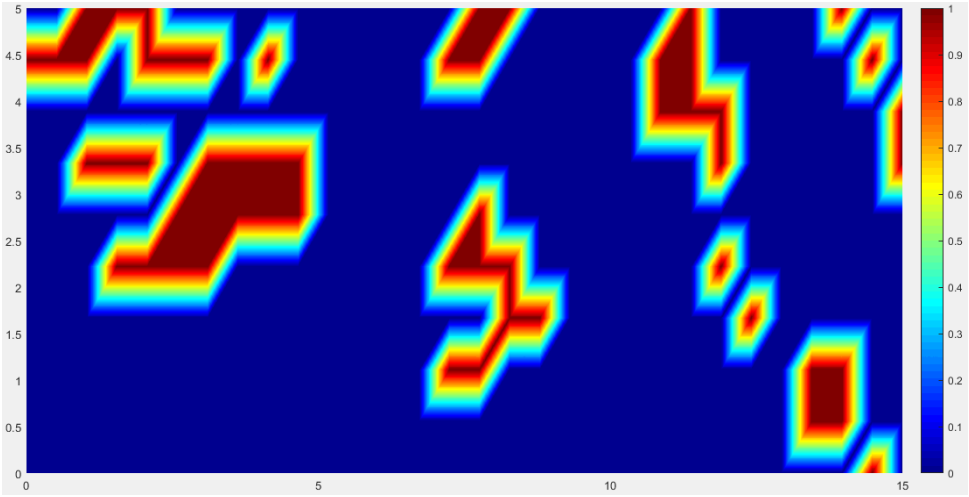
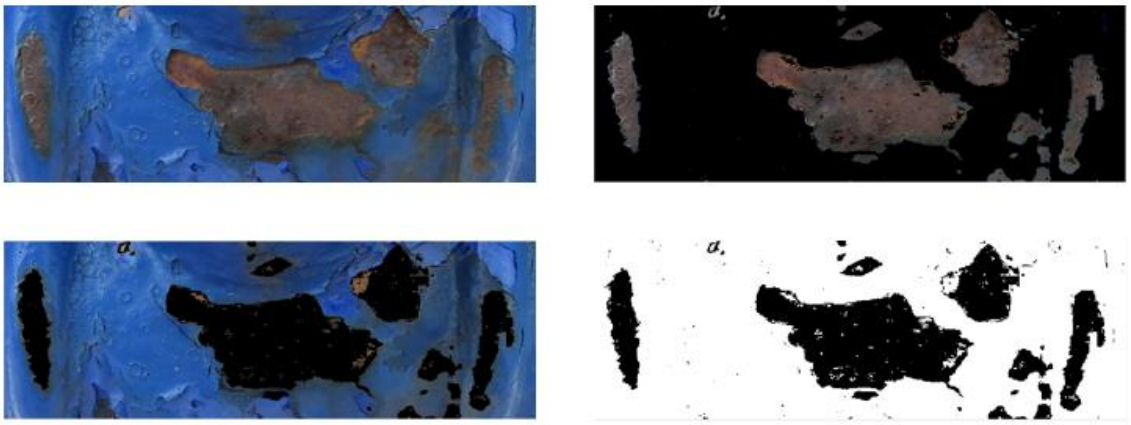


IMAGEN 1.7



A7=

0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	2	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	1	1	1	2	1	0
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	3	3	2	2	2	2	1	2	1	0	0	0	1	1	0	2	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	2	2	1	2	1	1	1	0	0	0	0	2	1	0
0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	2	1	2	1	1	1	0	0	0	0	2	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

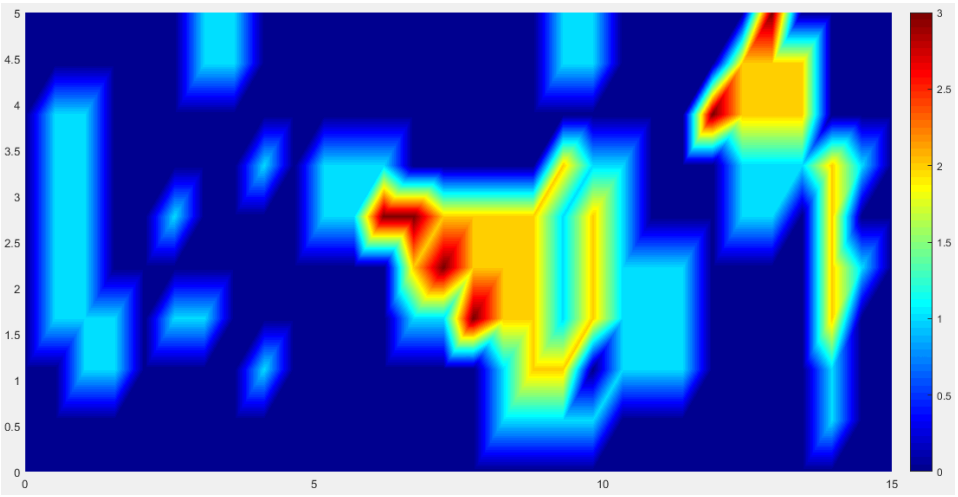


IMAGEN 1.8

A8=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	2	1	2	2
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0

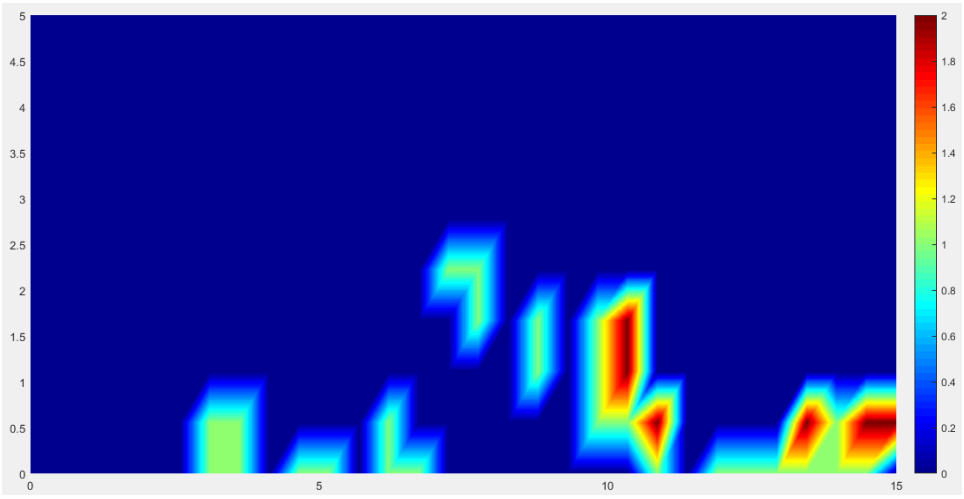
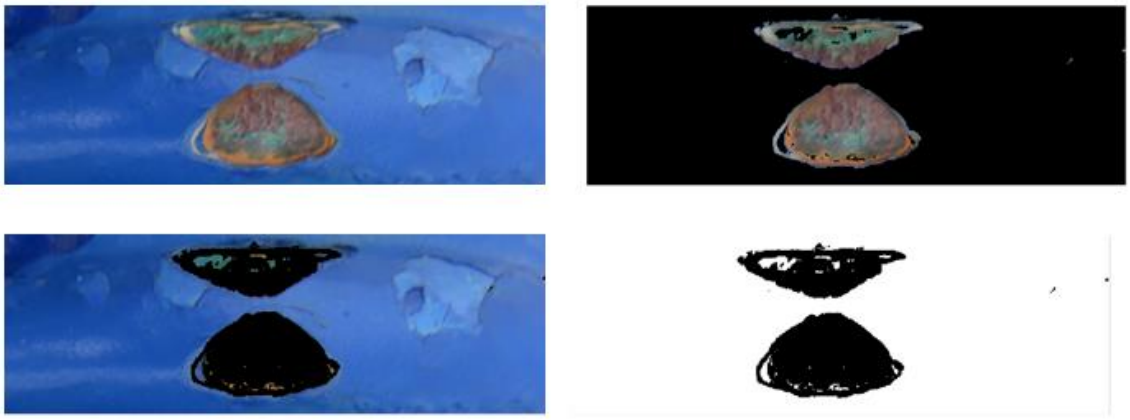


IMAGEN 1.9



A9=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	3	3	2	2	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

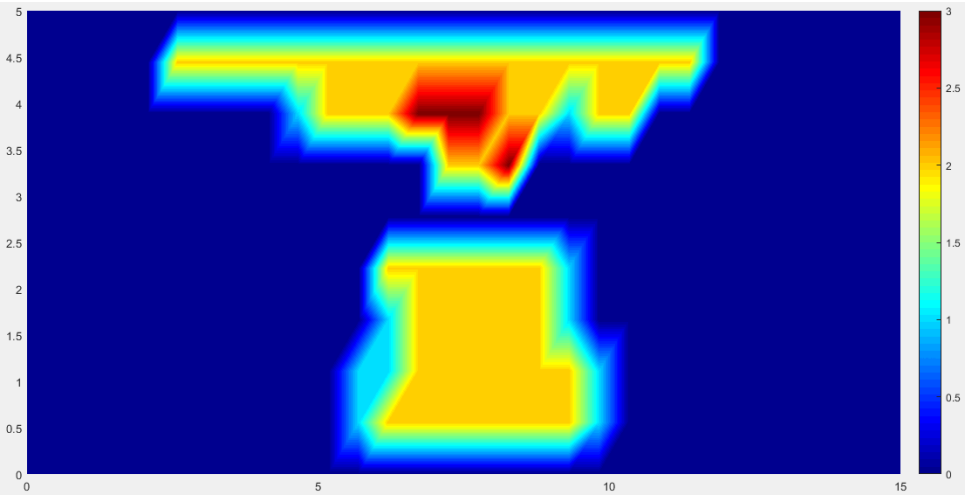
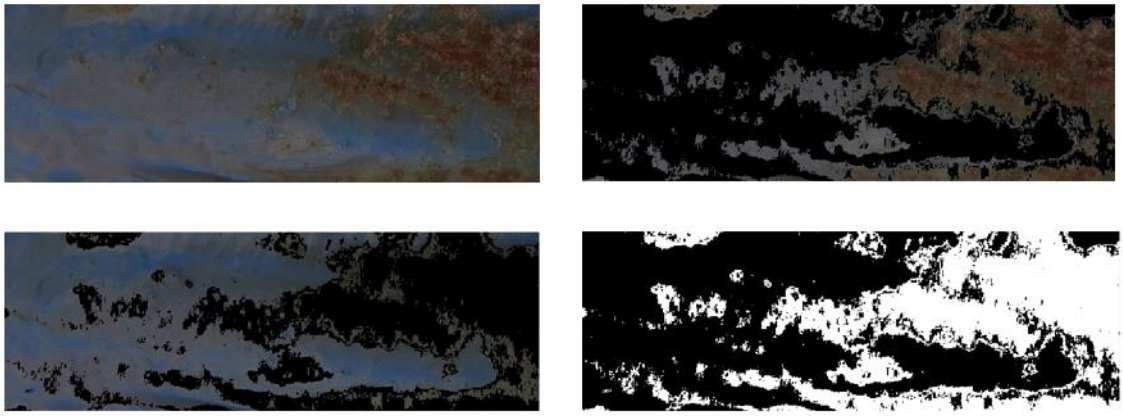


IMAGEN 1.10



A10=

0	0	0	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2
0	0	0	2	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3
1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	2	0	3	3
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1
0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1
1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1

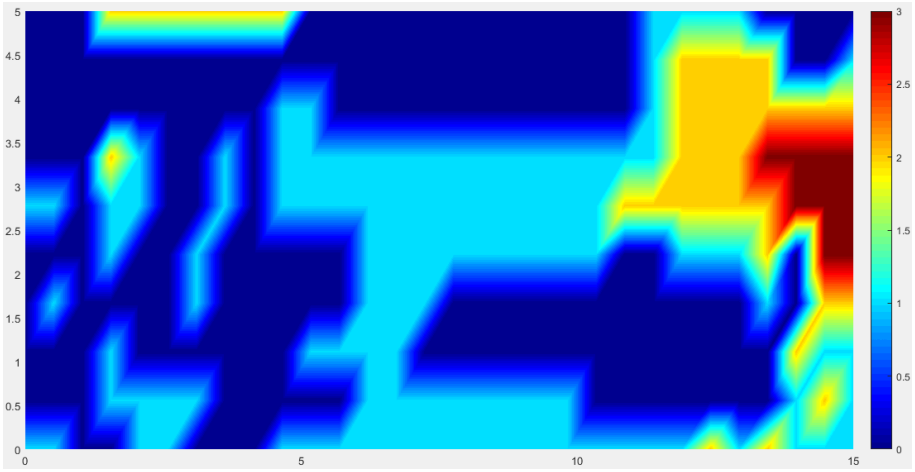
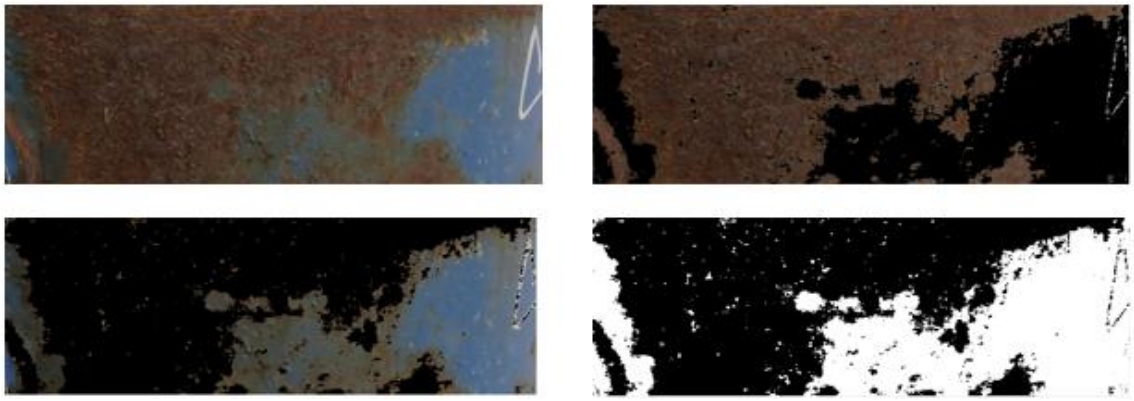


IMAGEN 1.11



A11=

2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
1	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
1	1	2	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
1	1	1	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
3	1	1	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
3	3	1	1	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	0	0	0
2	3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
2	3	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0

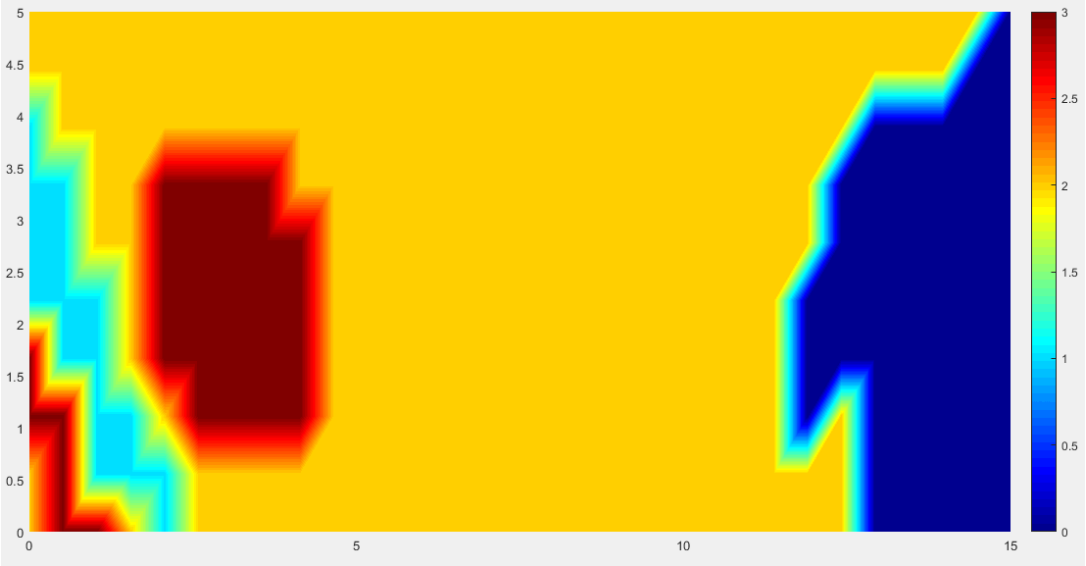
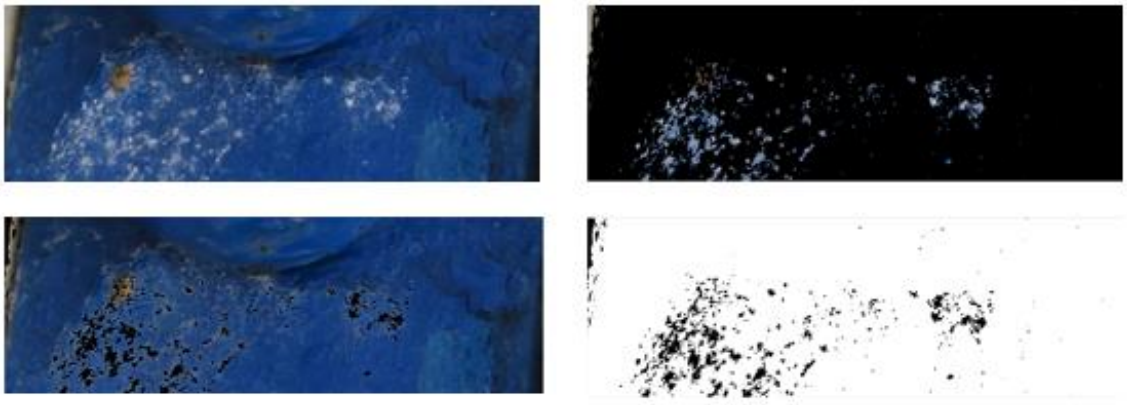


IMAGEN 1.12



A12=

1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

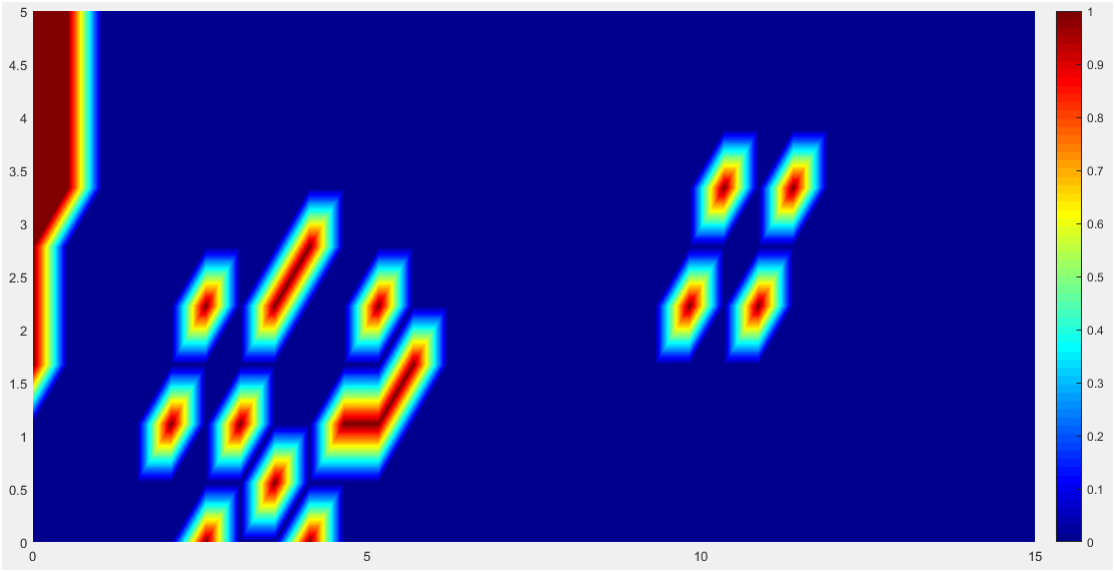
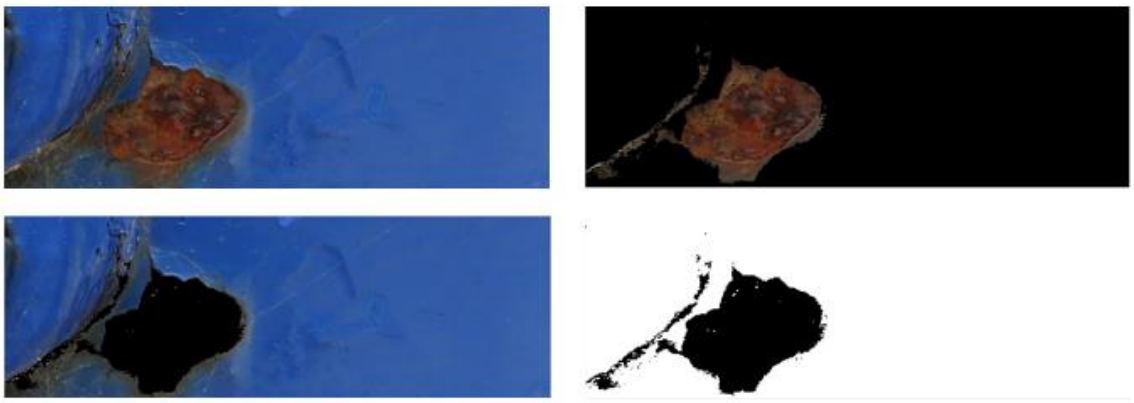


IMAGEN 1.13



A13=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	2	0	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

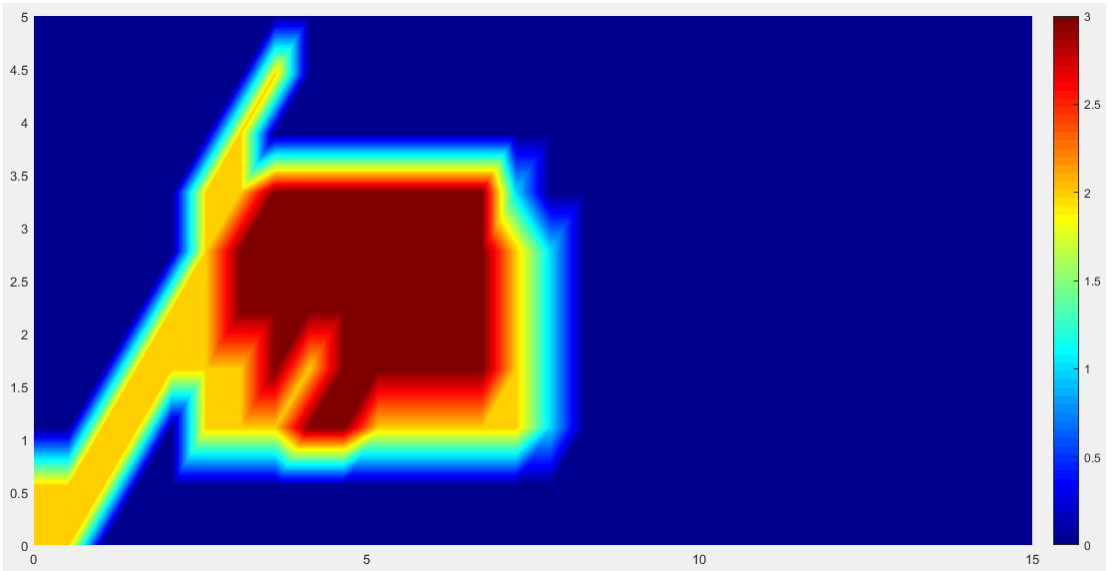
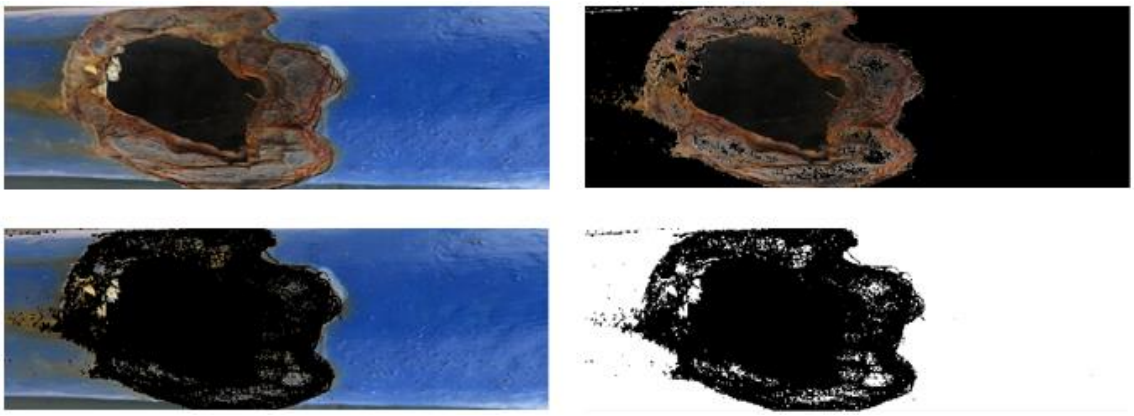


IMAGEN 1.14



A14=

0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

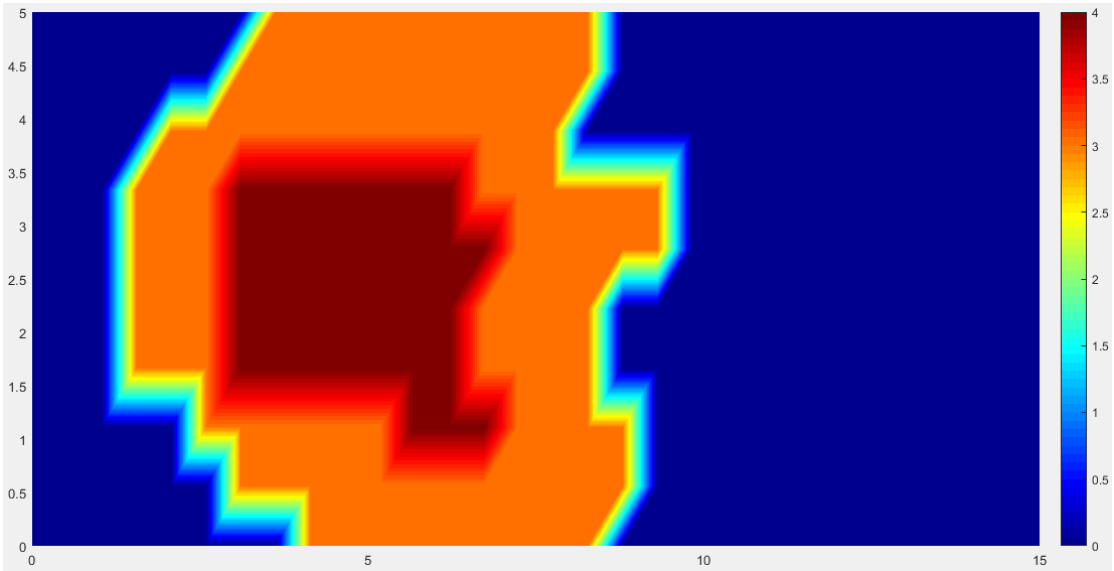
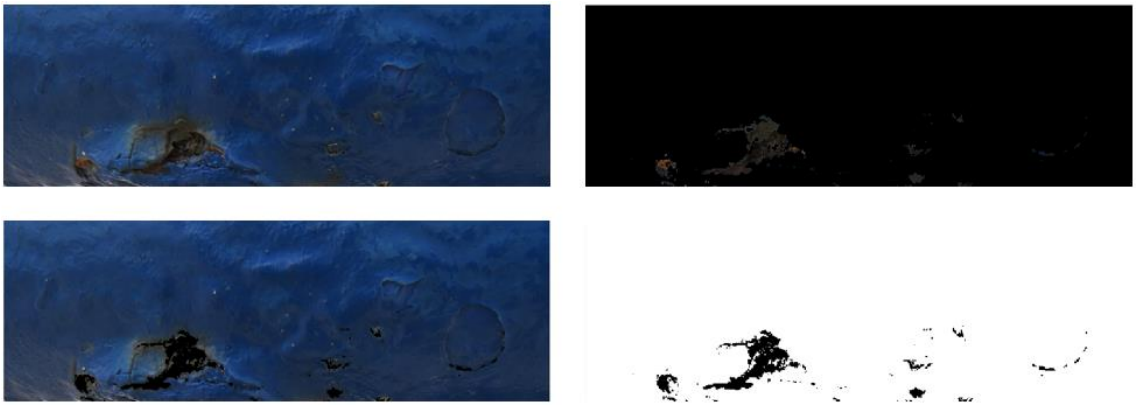


IMAGEN 1.15



A15=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	2	2	0	0	2	2	0	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

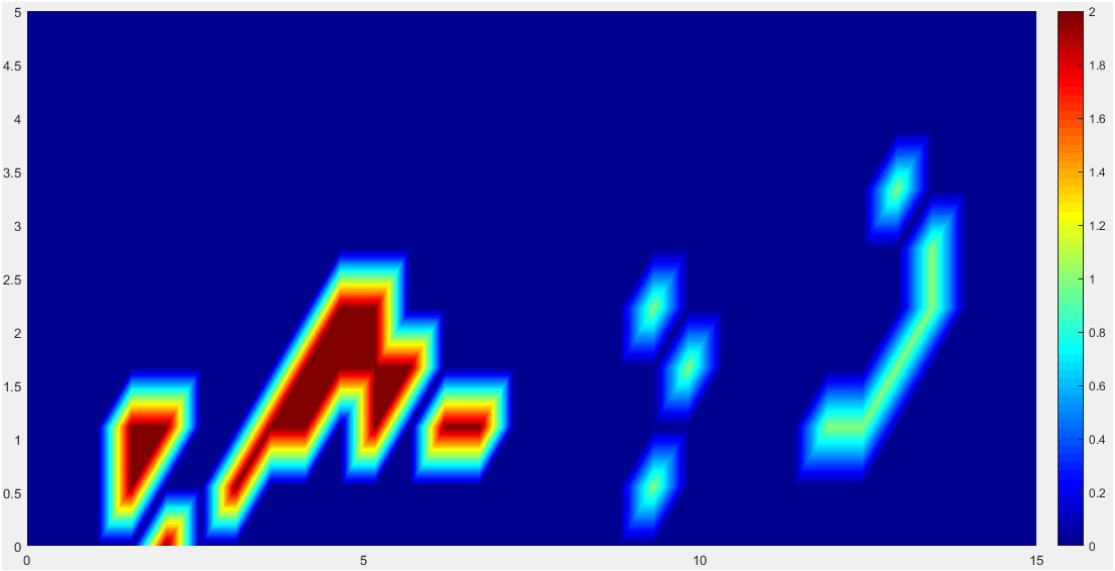
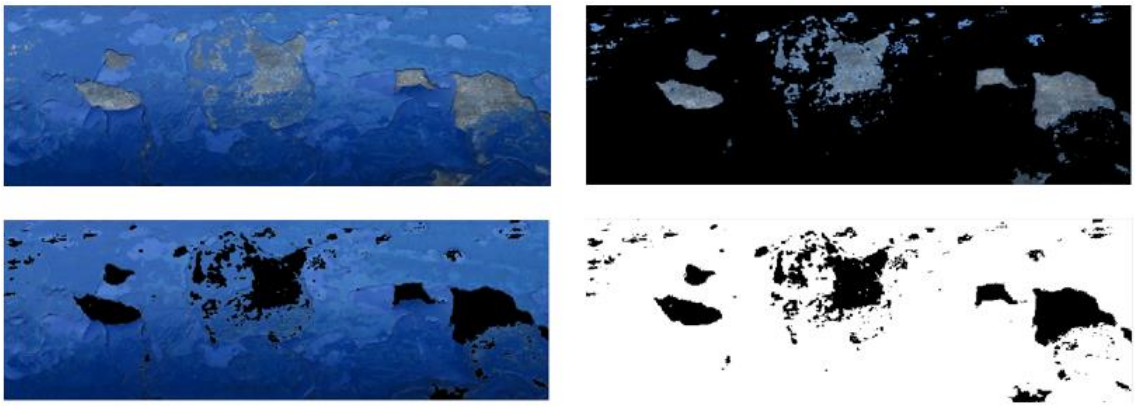


IMAGEN 1.16



A16=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

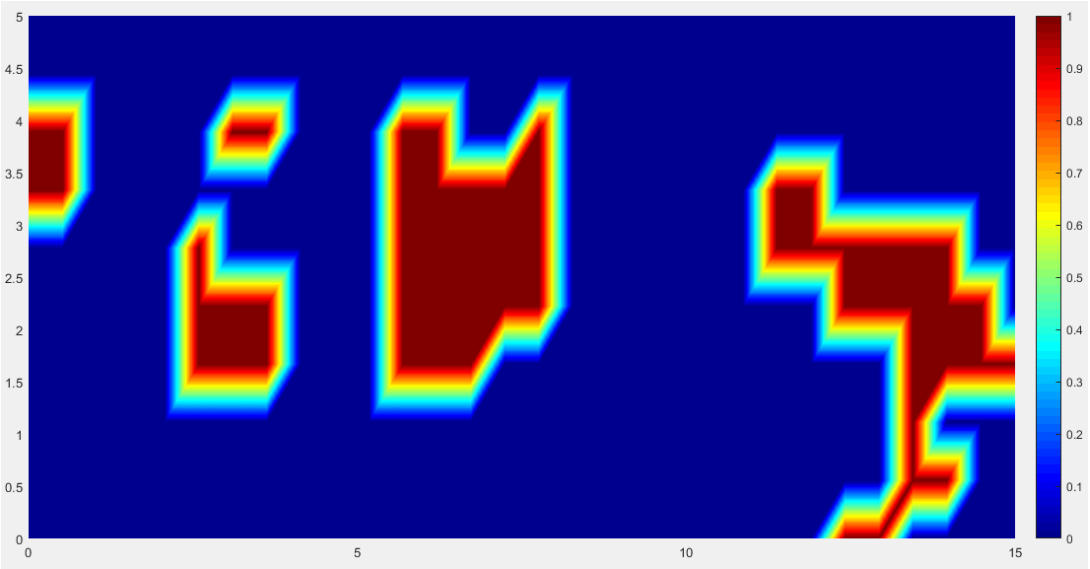
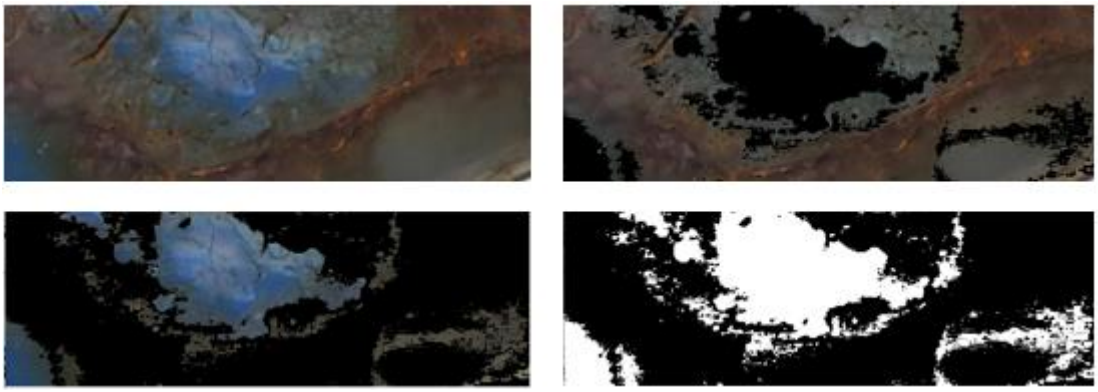


IMAGEN 1.17



A17=

3	3	3	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	0	4	0	3	3	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
3	3	3	3	4	2	0	3	3	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
0	3	3	4	2	2	3	3	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	
0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

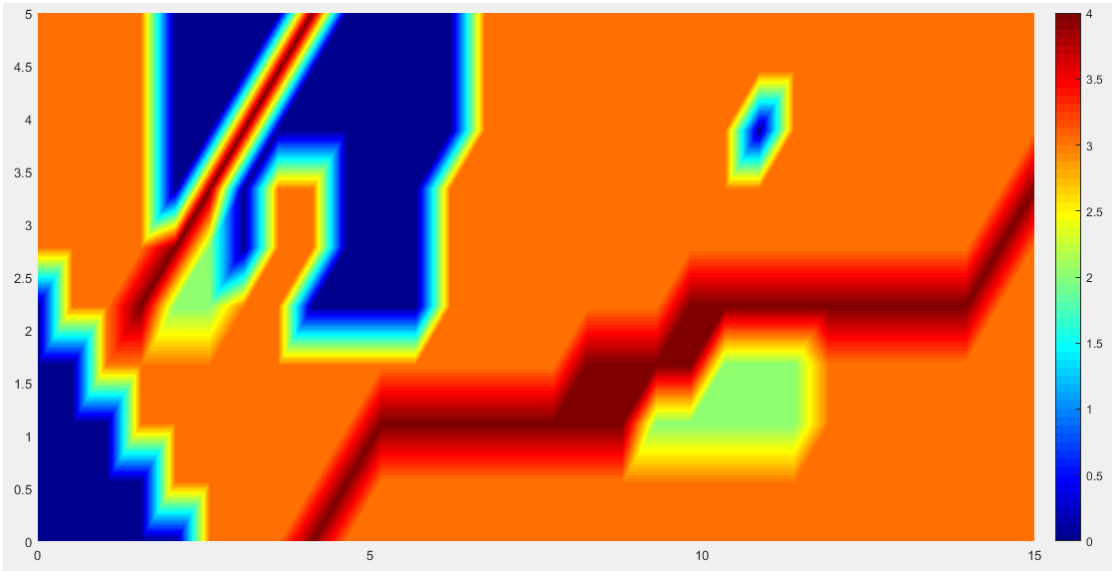
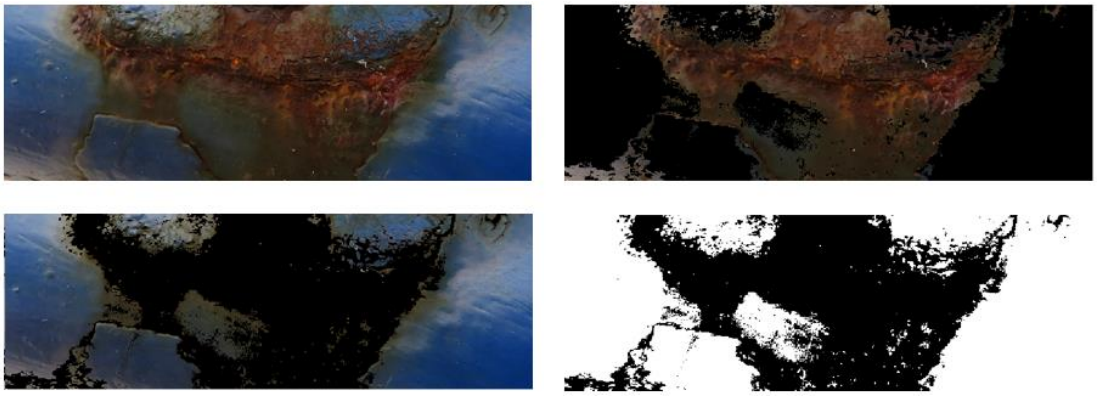


IMAGEN 1.18



A18=

0	0	0	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	4	3	0	0
0	0	0	0	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	2	2	2	2	4	3	0	3	0
0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	2	2	2	2	4	3	0	0	0
0	0	0	0	0	0	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	2	4	3	3	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	4	4	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	2	2	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

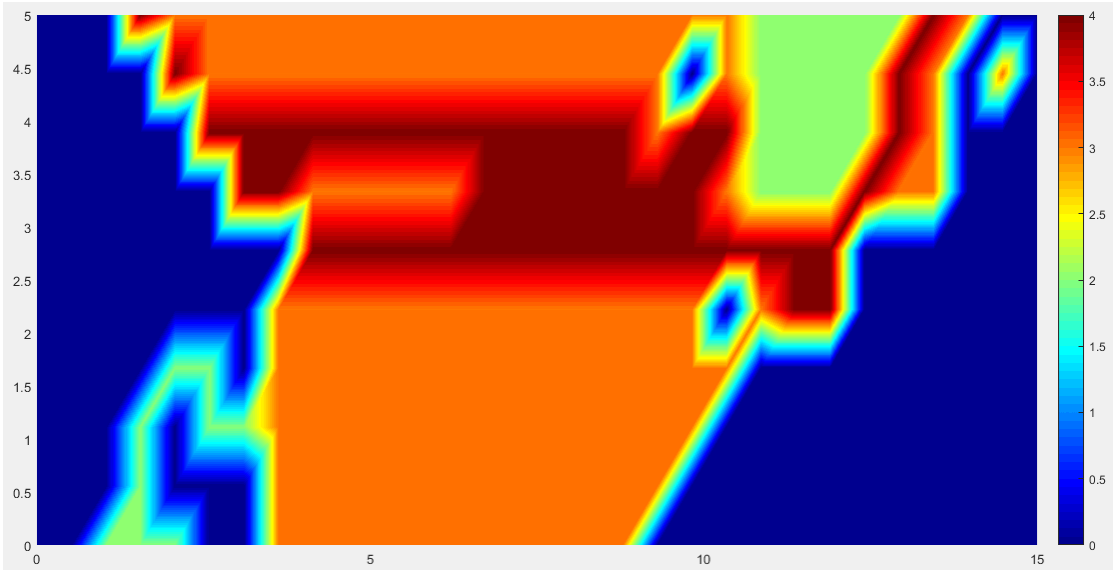
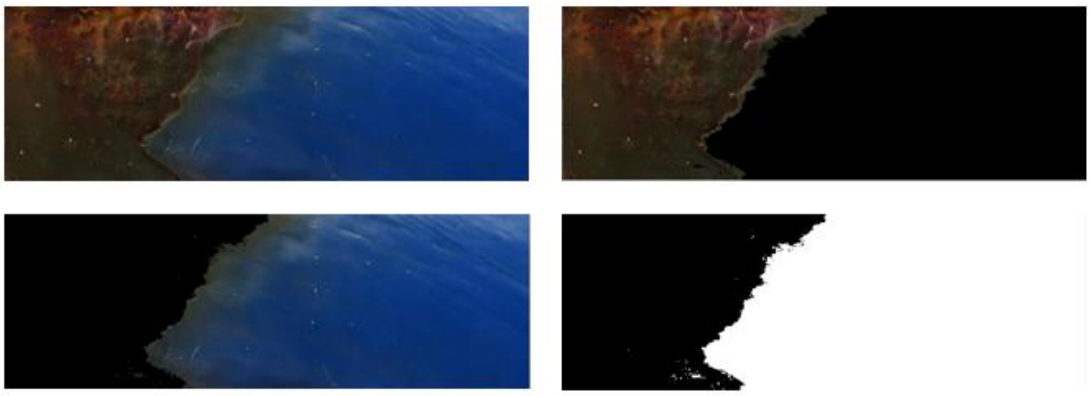


IMAGEN 1.19



A19=

3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

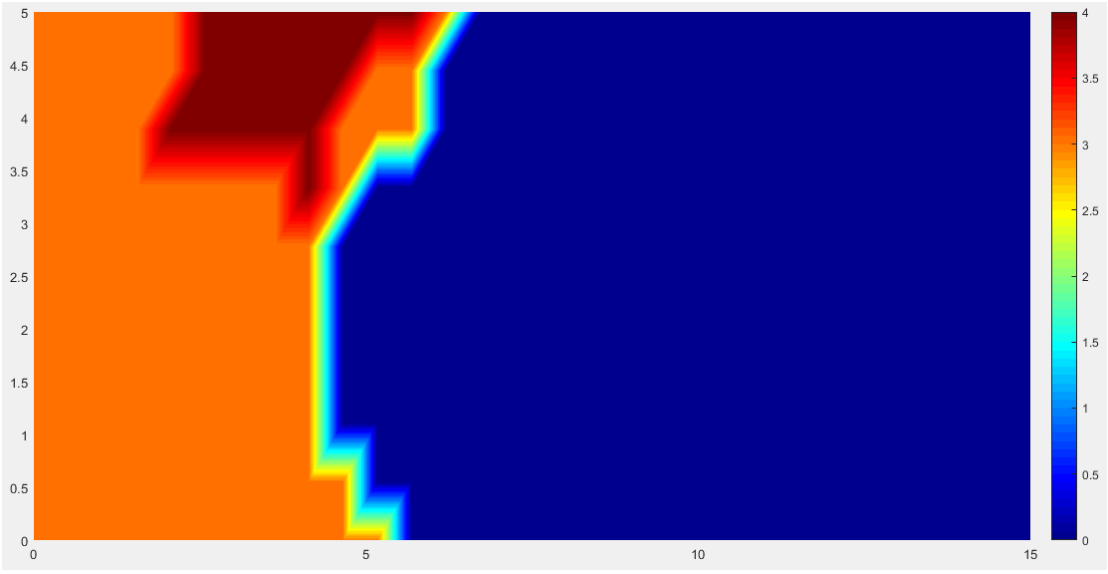
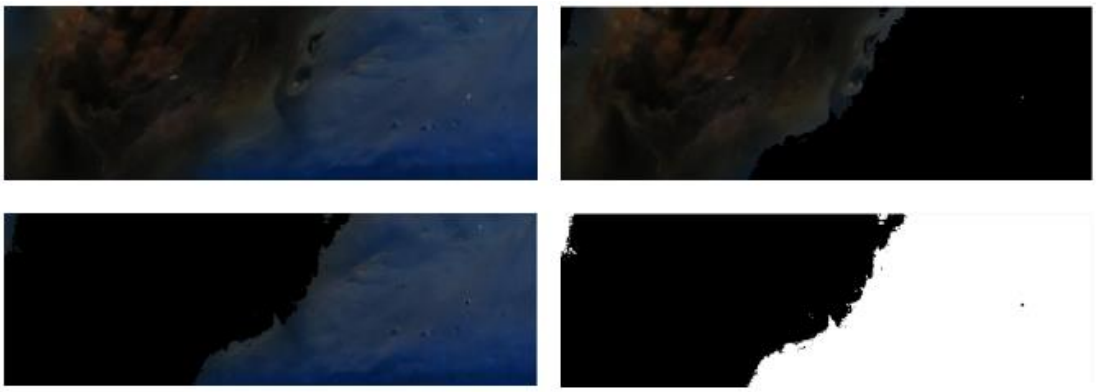


IMAGEN 1.20



A20=

3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

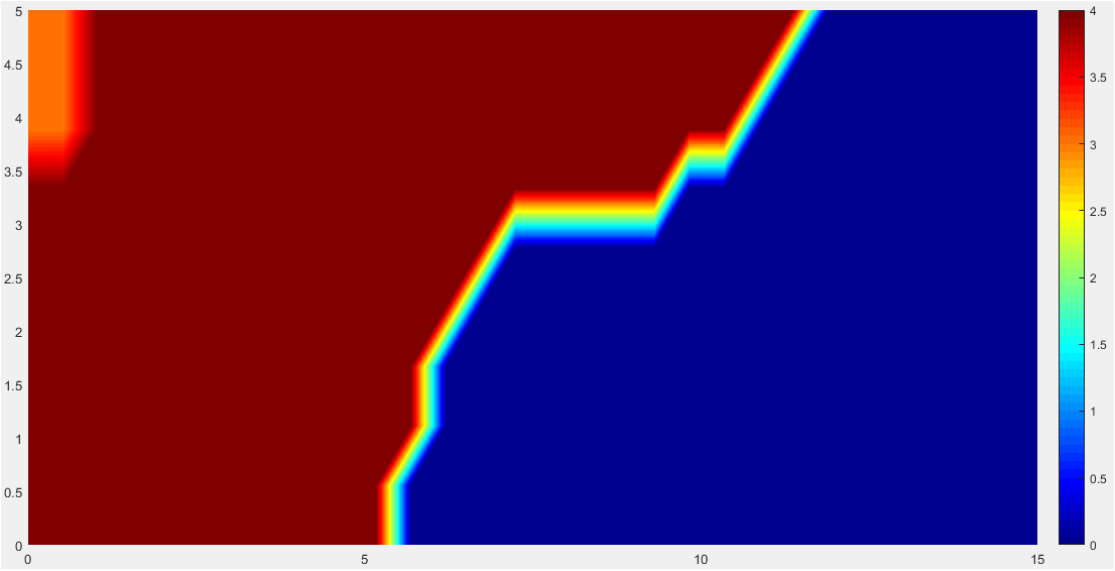
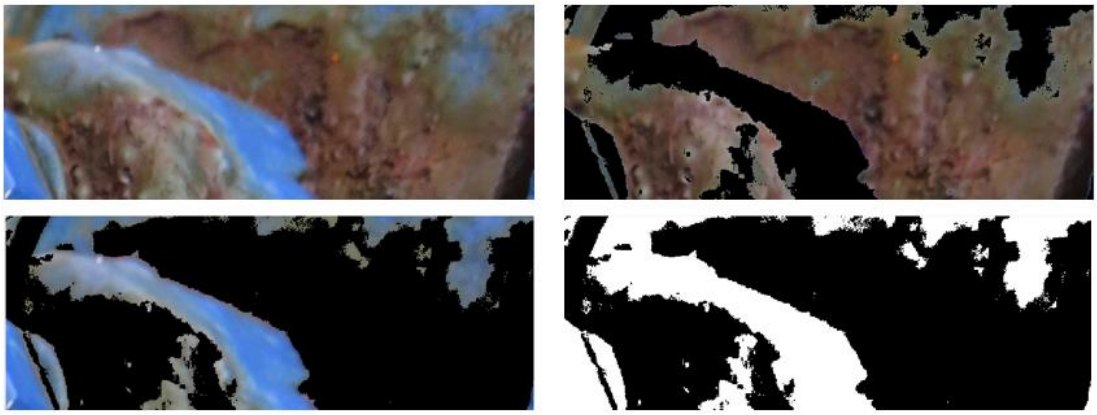


IMAGEN 1.21



A21=

0	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0	2	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	0	0	0	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	3
2	2	2	2	0	0	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	0	4	3	4	4	4	4	4	2	2	3	3
2	3	3	3	3	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	3	3
0	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	2	2	4	4
0	0	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	4	4
0	0	4	4	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	4	4	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	4	4	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

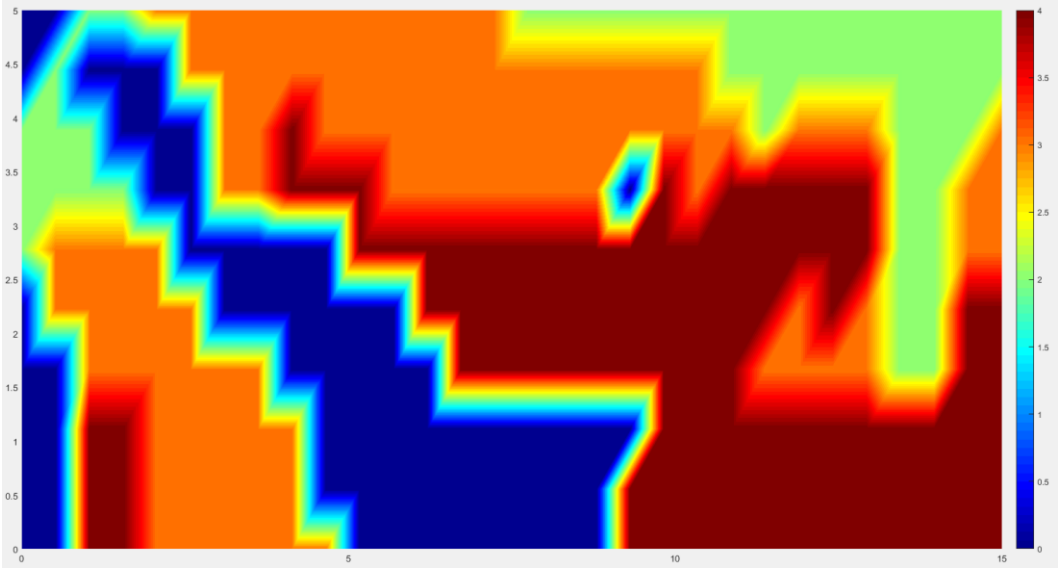
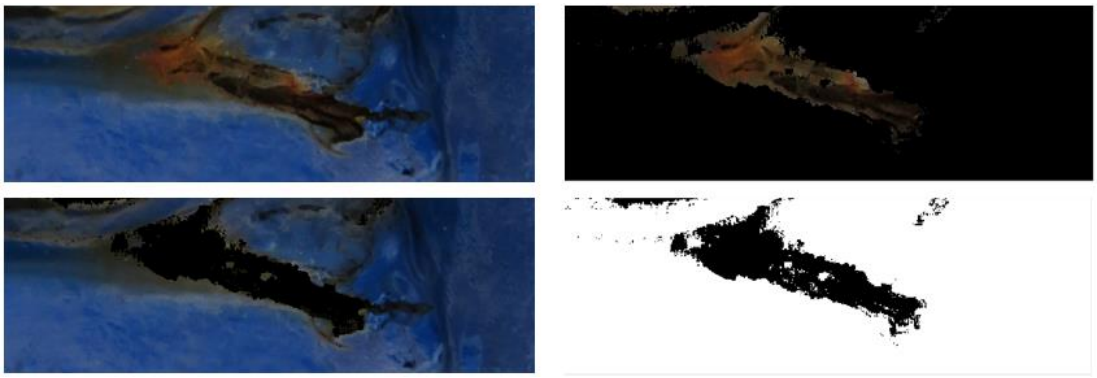


IMAGEN 1.22



A22=

0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	3	4	4	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	3	4	4	4	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

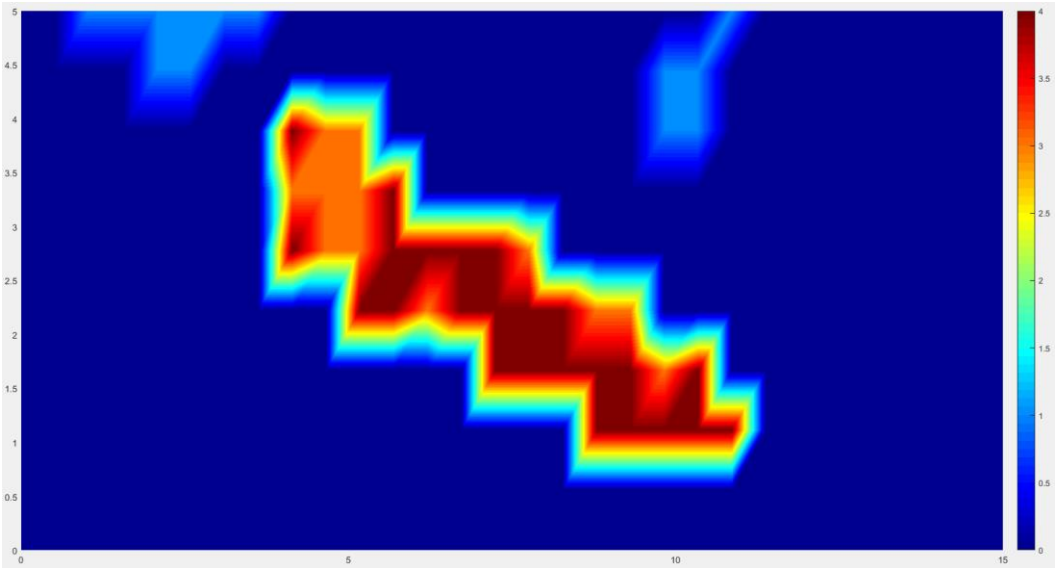
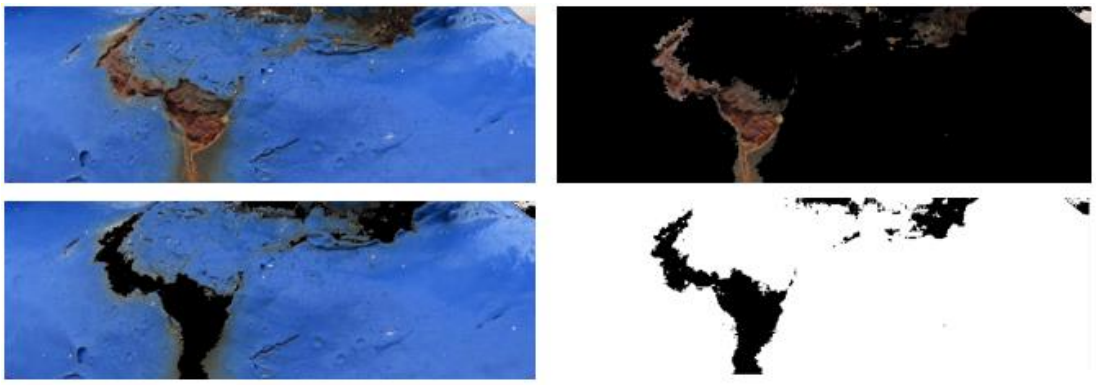


IMAGEN 1.23



A23=

0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	4	4	0	0	4	4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	4	4	3	4	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	3	3	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

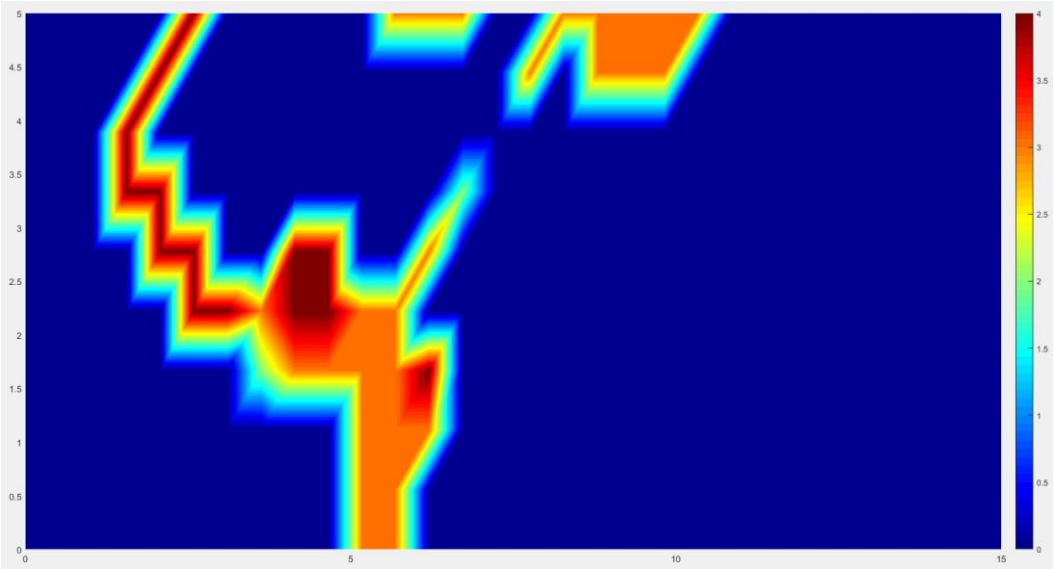
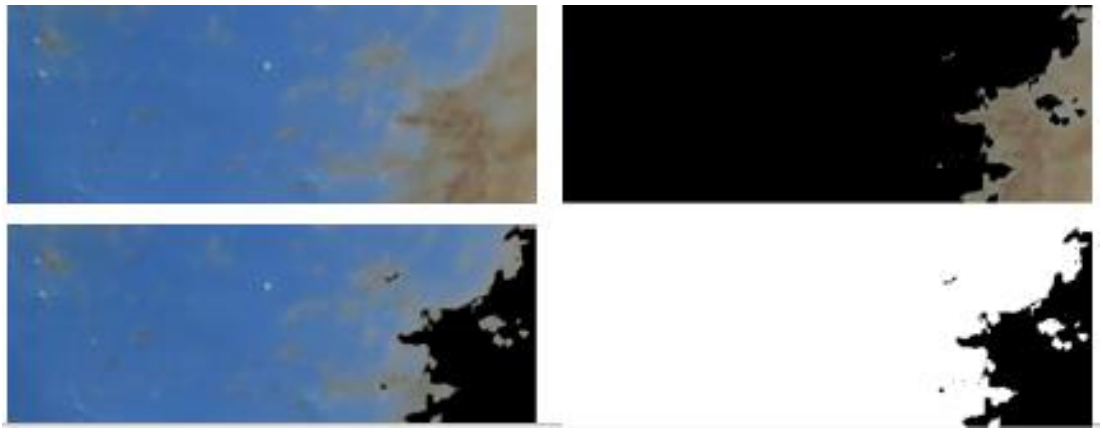


IMAGEN 1.24



A24=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

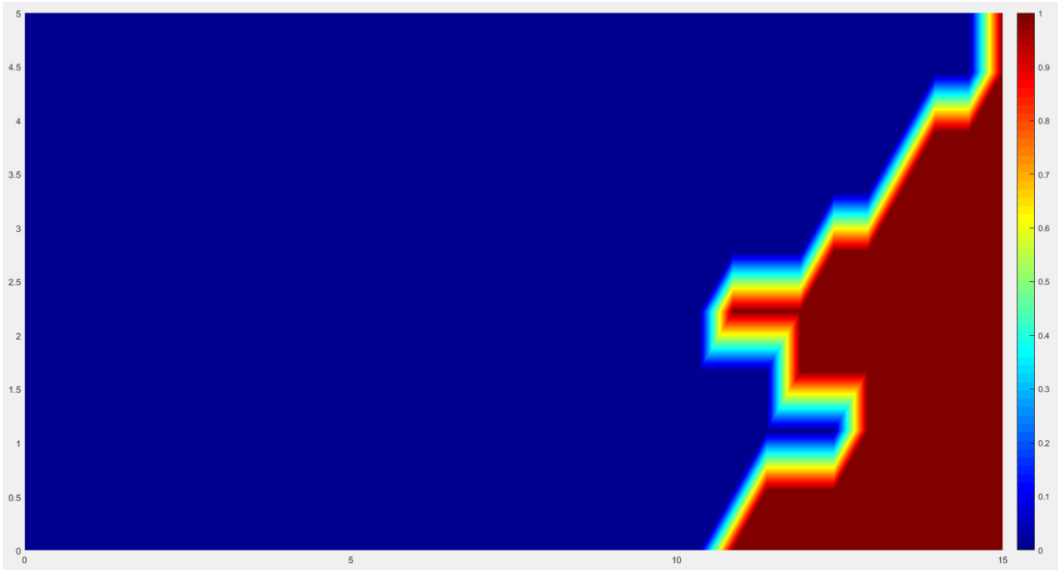


IMAGEN 1.25

A25=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

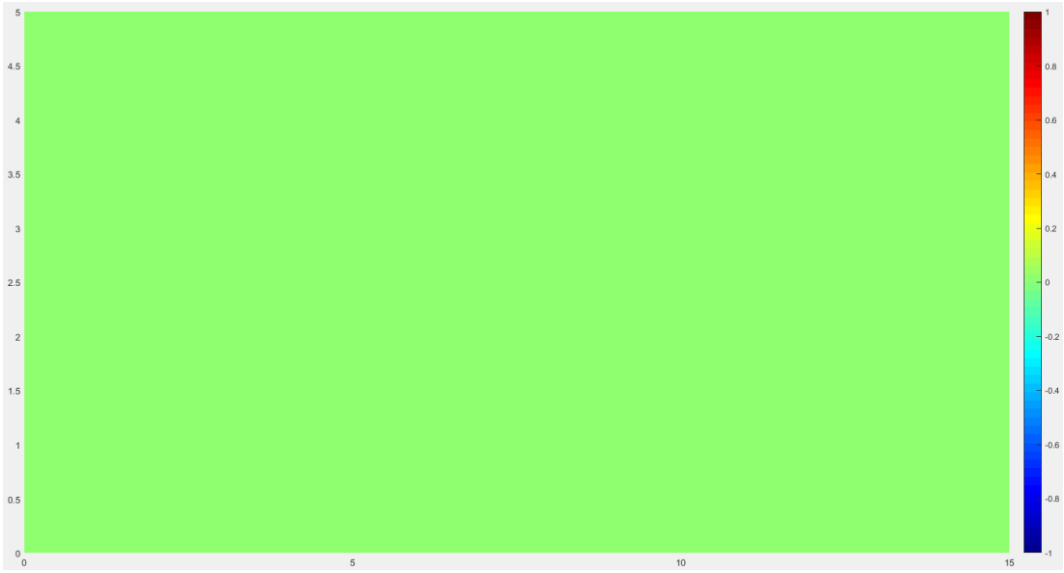
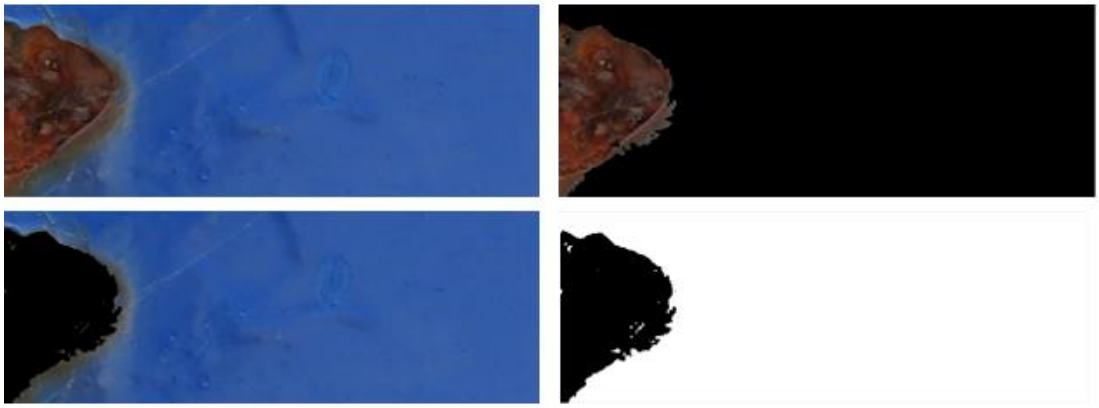


IMAGEN 1.26



A26=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

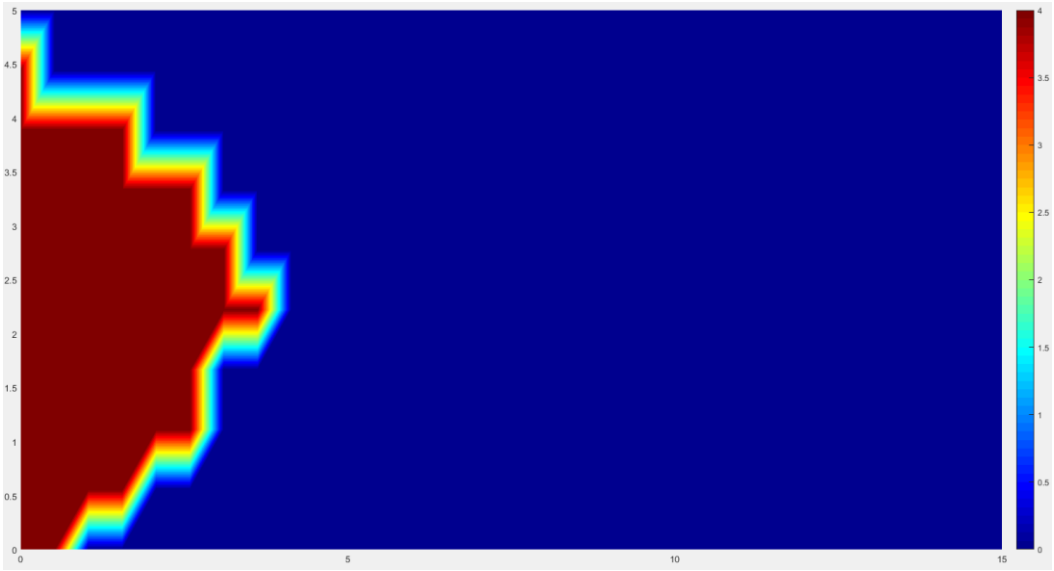


IMAGEN 1.27

A27=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

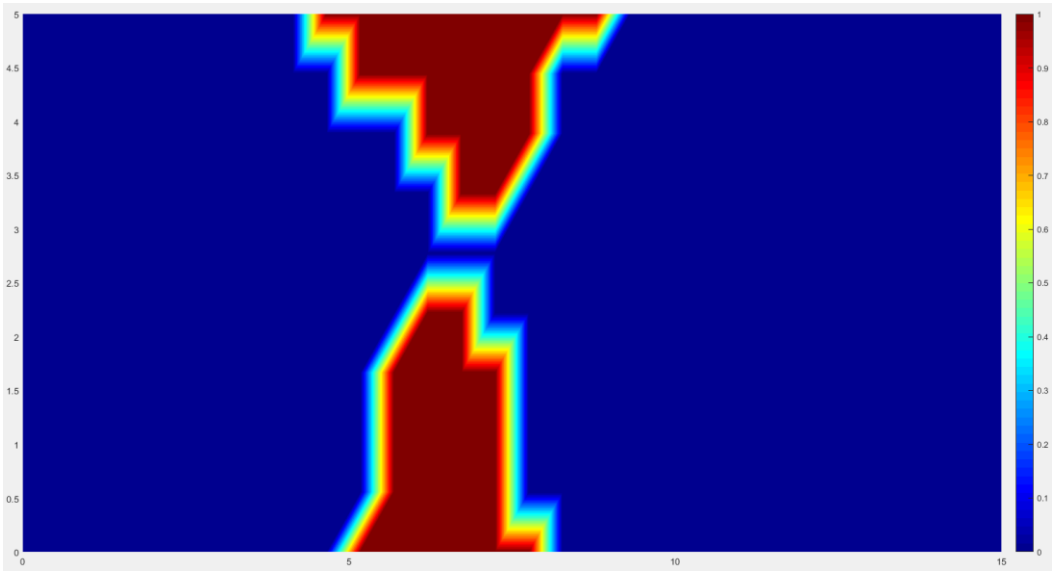
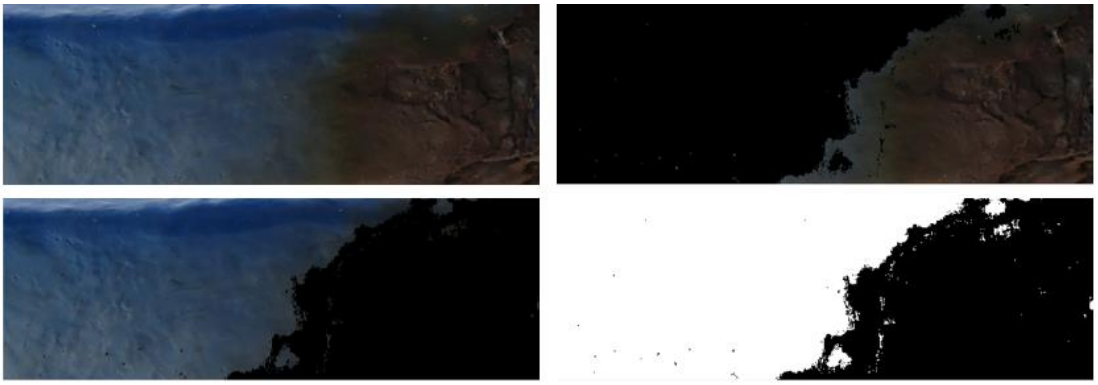


IMAGEN 1.28



A28=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3

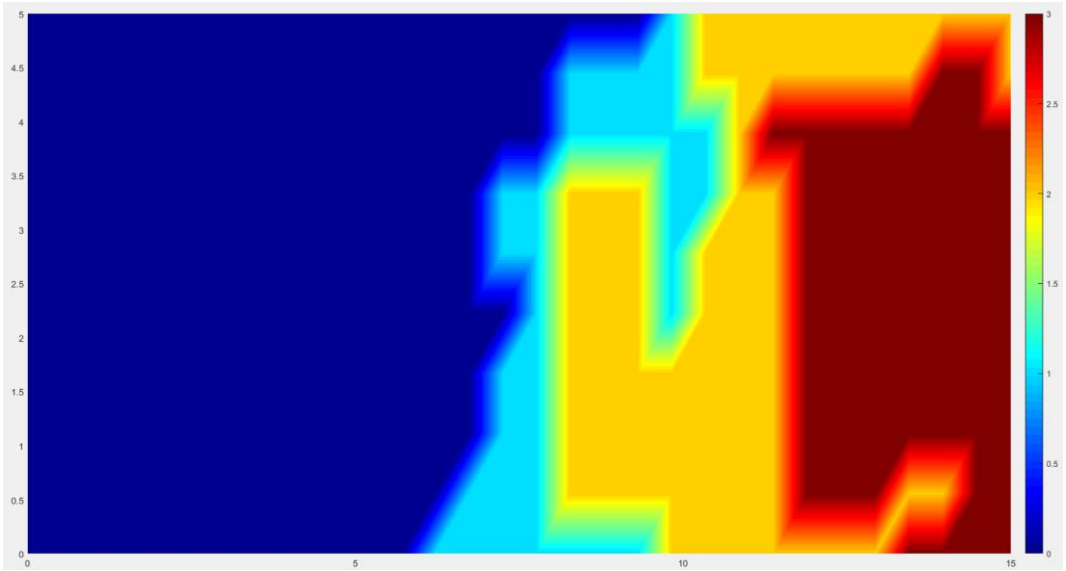
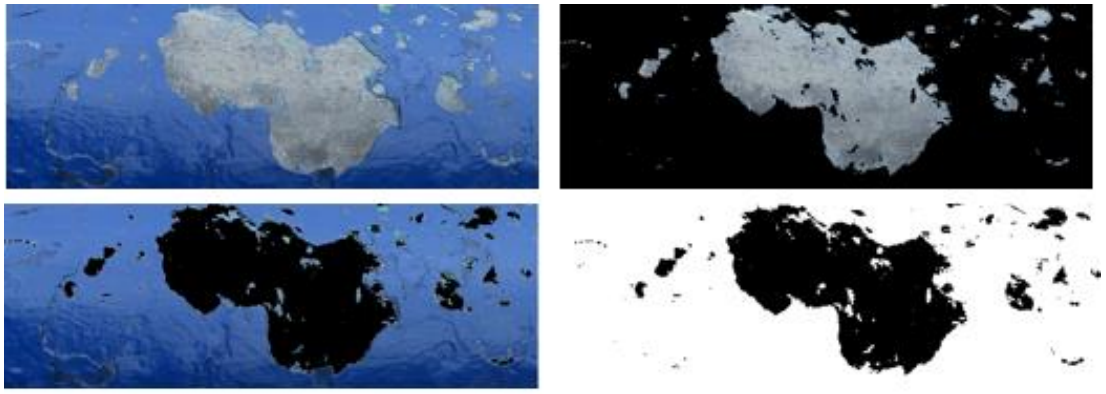


IMAGEN 1.29



A29=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

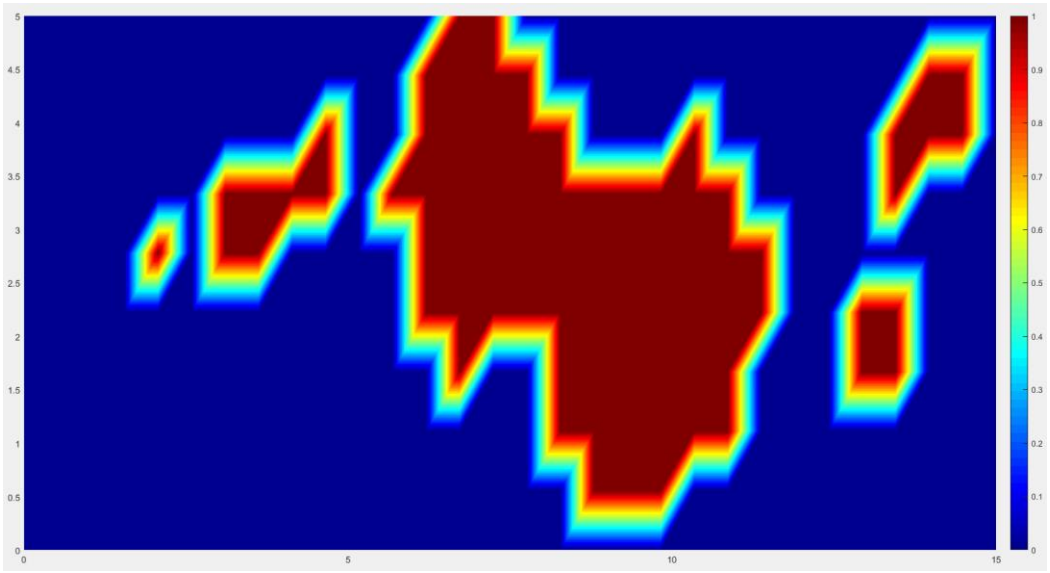
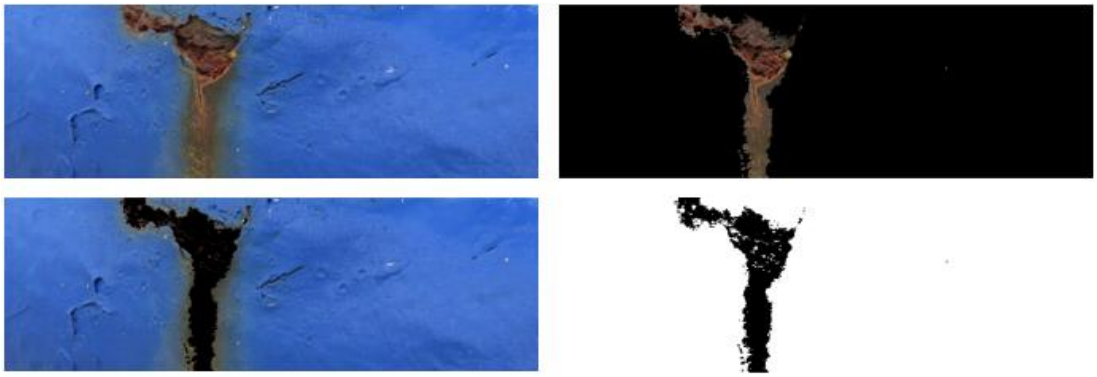
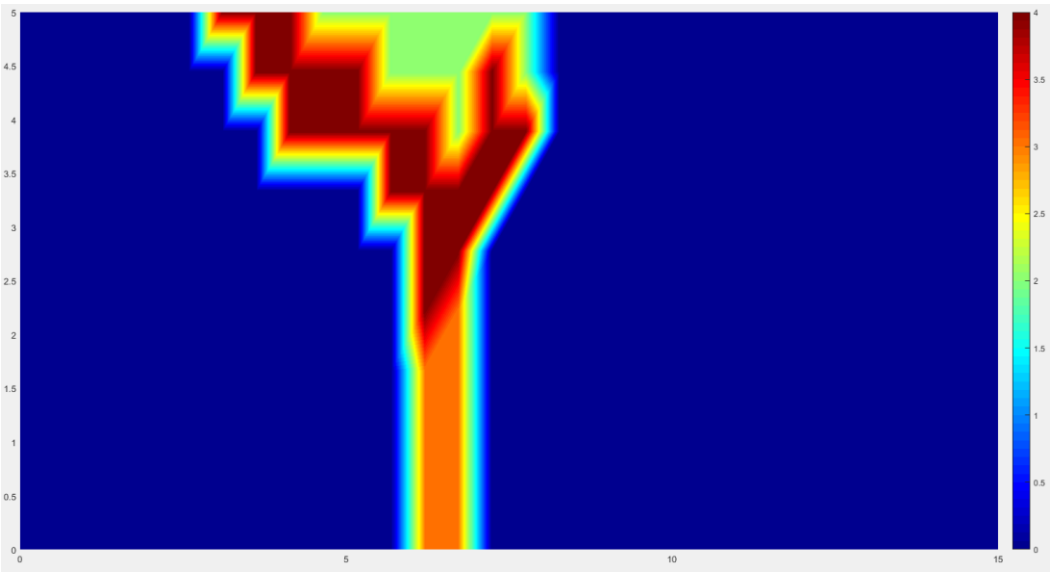


IMAGEN 1.30



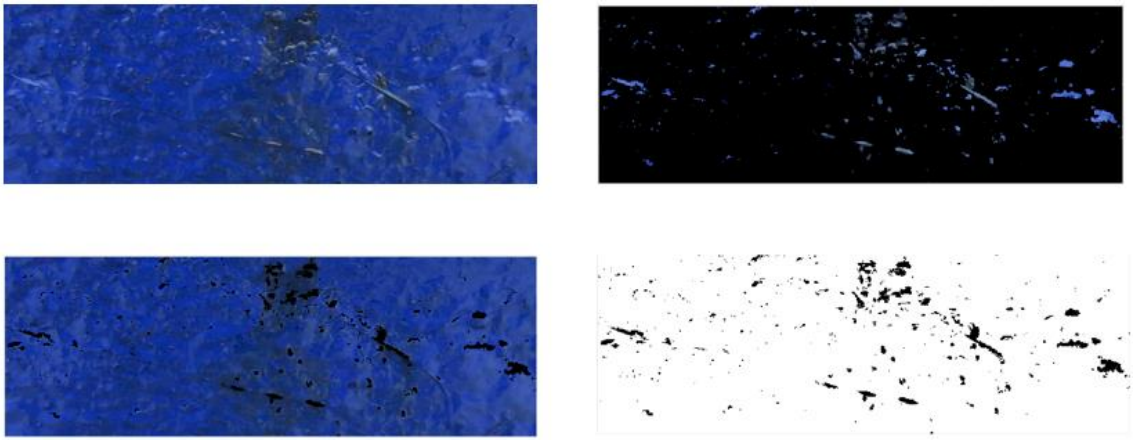
A30=

0	0	0	0	0	0	4	4	4	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	2	2	2	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	2	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



ZONA 2

IMAGEN 2.1



B1=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

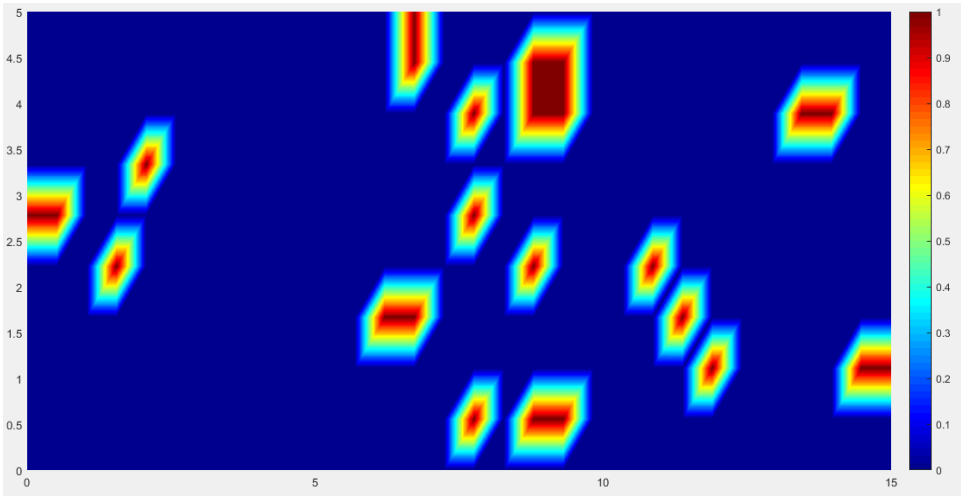
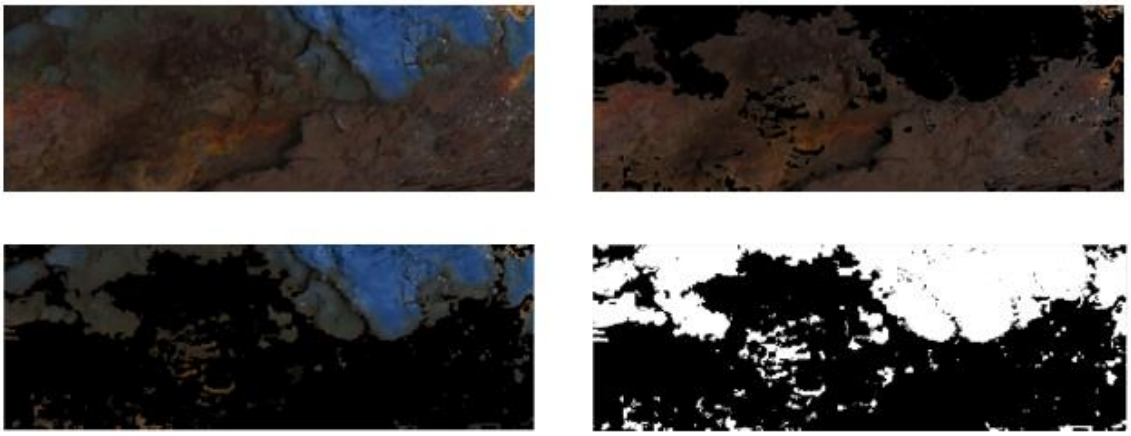


IMAGEN 2.2



B2=

3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	4	3	3
3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	3
2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4
2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

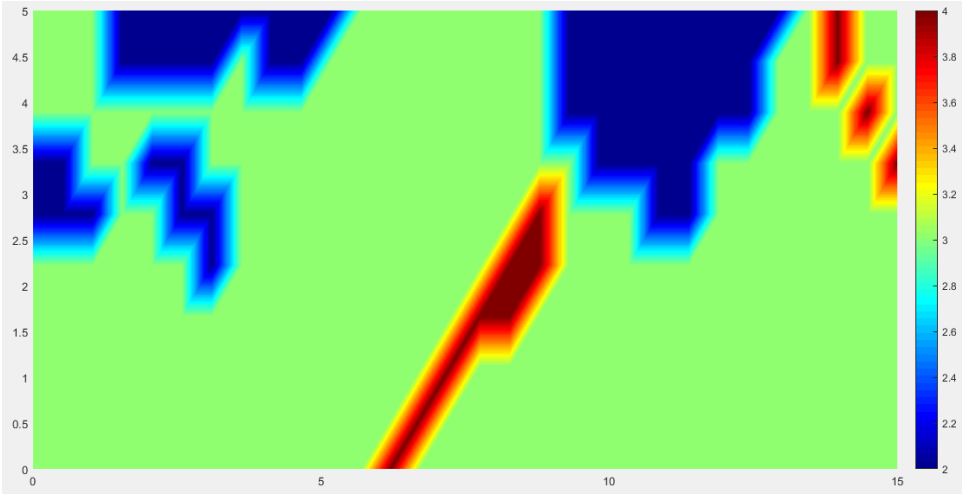
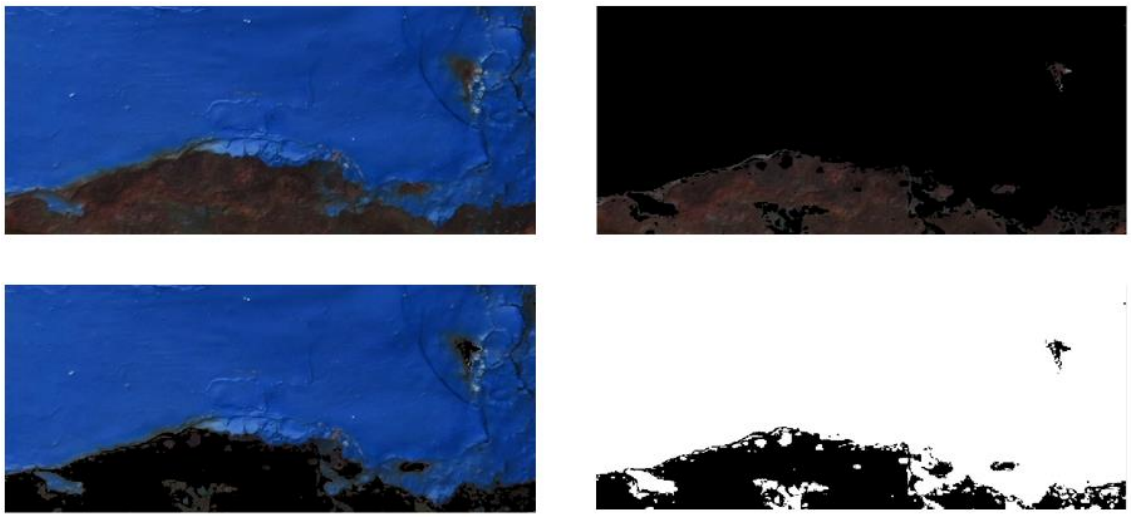


IMAGEN 2.3



B3=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

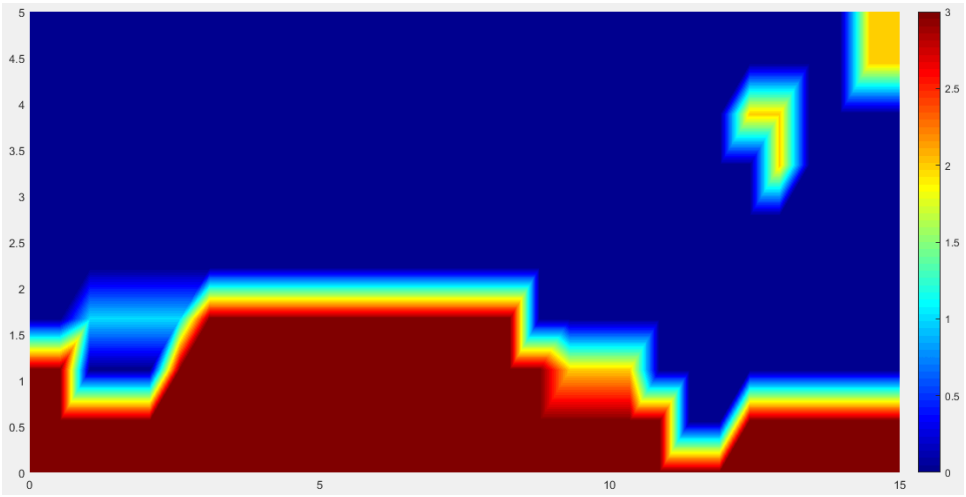
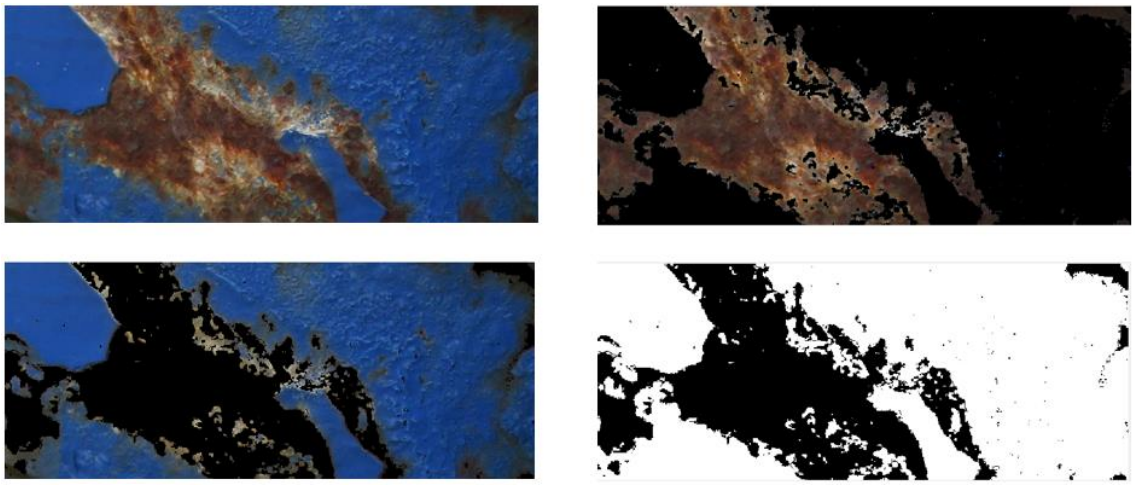


IMAGEN 2.4



B4=

0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
0	0	0	0	0	3	3	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2
0	0	0	0	0	2	3	3	2	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	2	2	2	3	2	2	2	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	0	0	2	2	2	3	2	2	2	2	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	0	0	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0

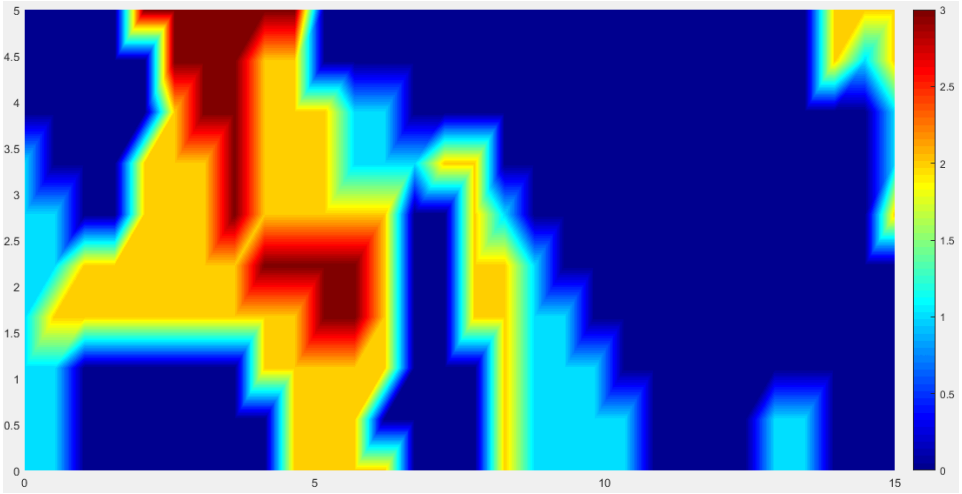
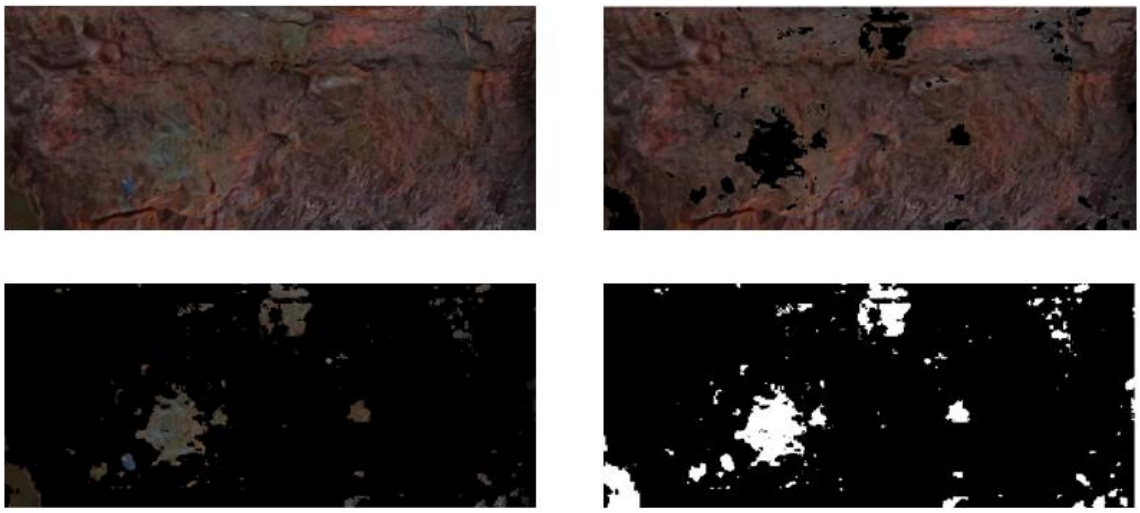


IMAGEN 2.5



B5=

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	4	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

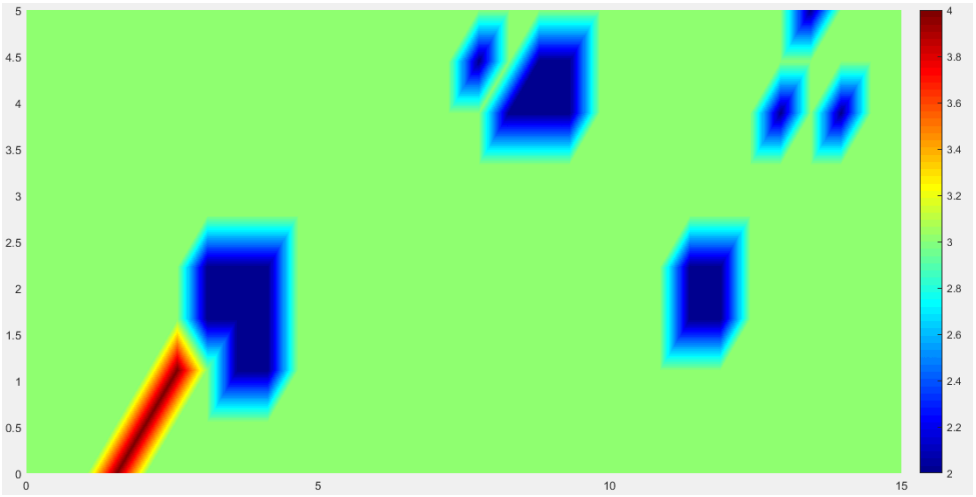
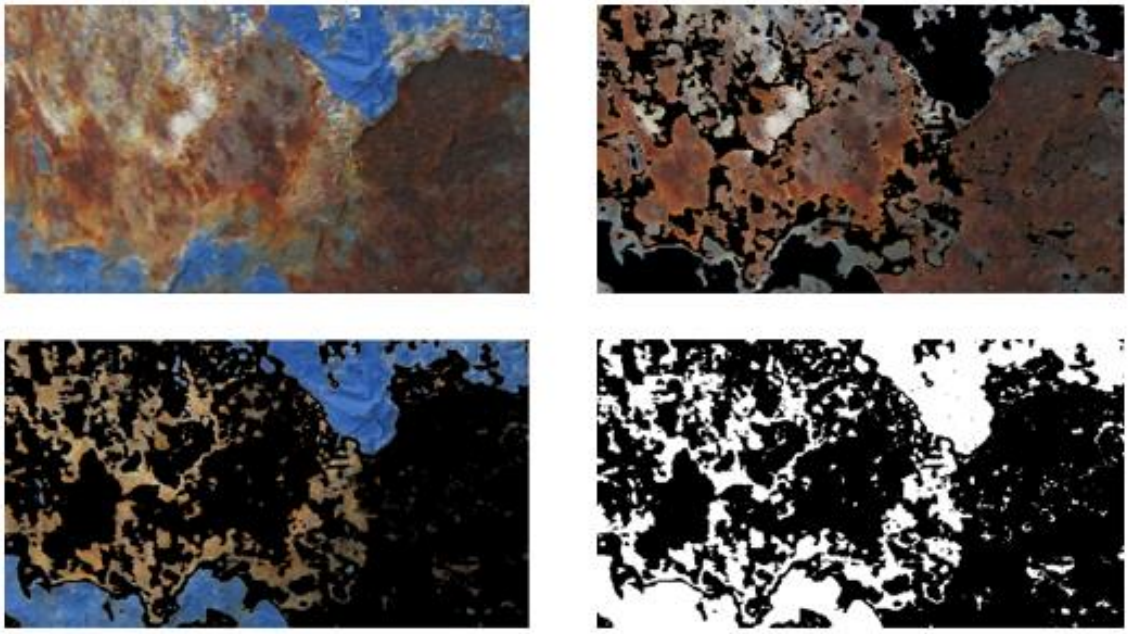


IMAGEN 2.6



B6=

2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	1	0	1	3	3	1	1	1	1	1	3	3	3
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

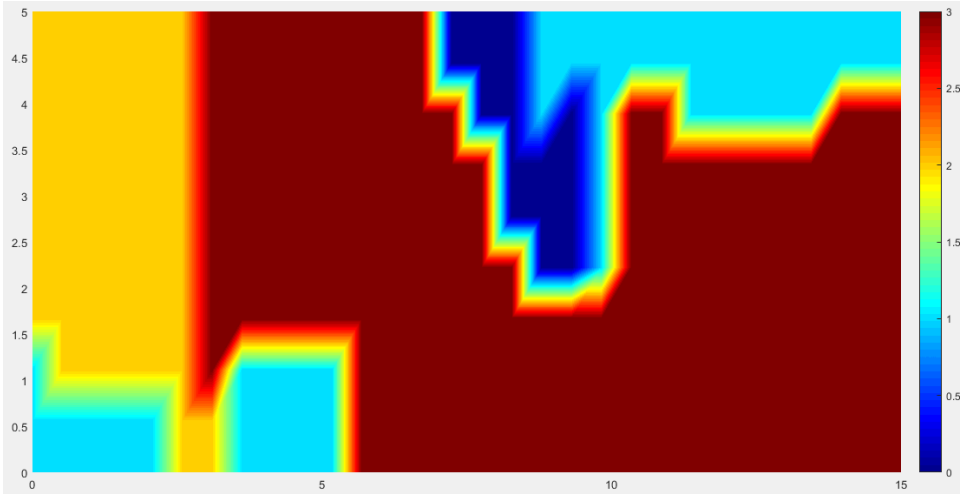
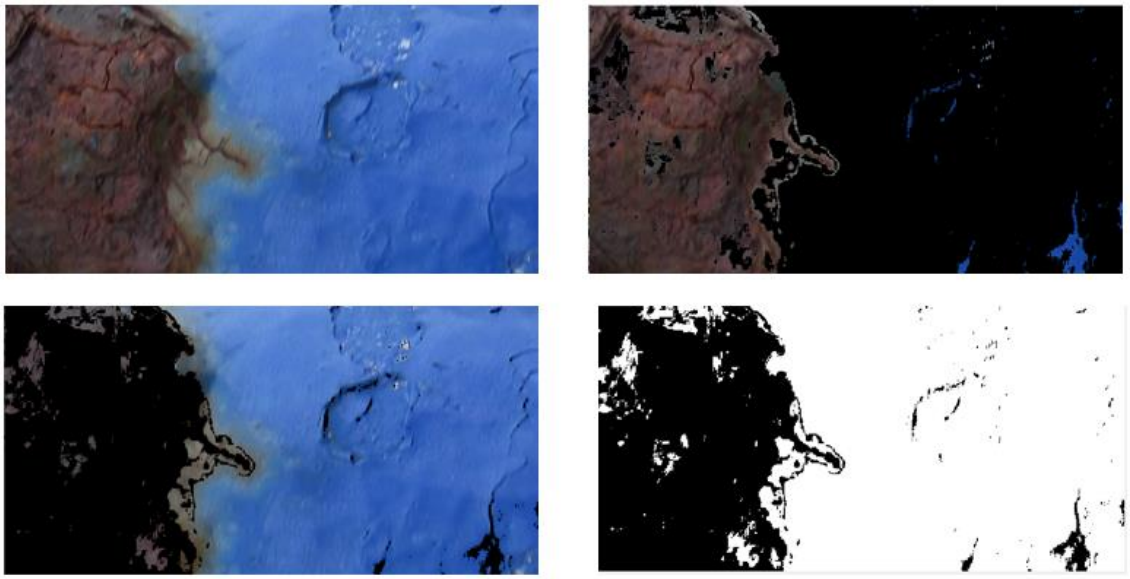


IMAGEN 2.7



B7=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

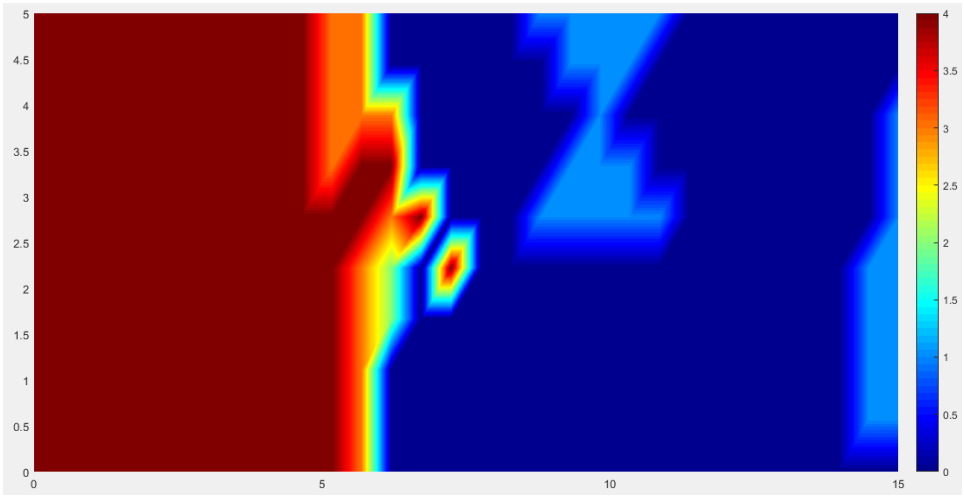
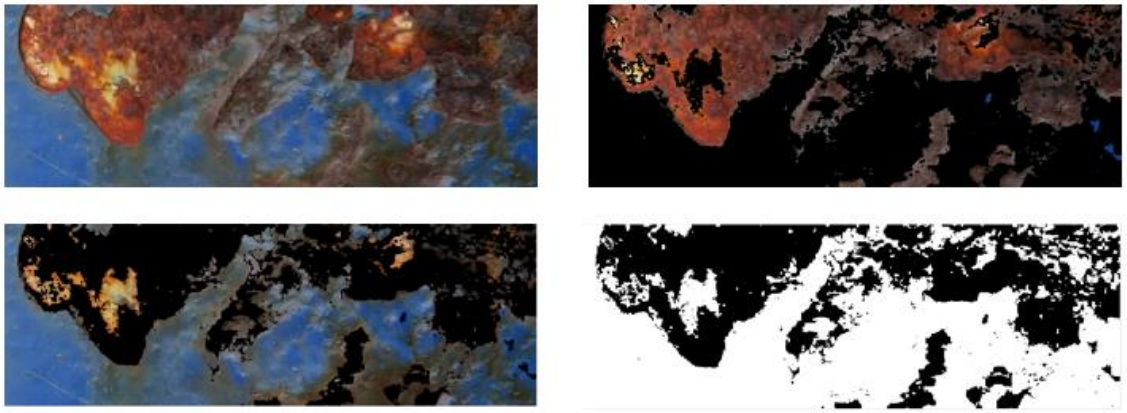


IMAGEN 2.8



B8=

0	4	4	2	2	4	4	2	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4
0	4	4	4	4	4	4	2	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4
0	4	4	4	4	4	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
0	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	4	4	4
0	0	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	4	4	4
0	0	4	0	4	0	0	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	2	2	0	0	0	0
0	0	0	4	4	4	0	2	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	2	2	0	0	0	0
0	0	0	0	4	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1

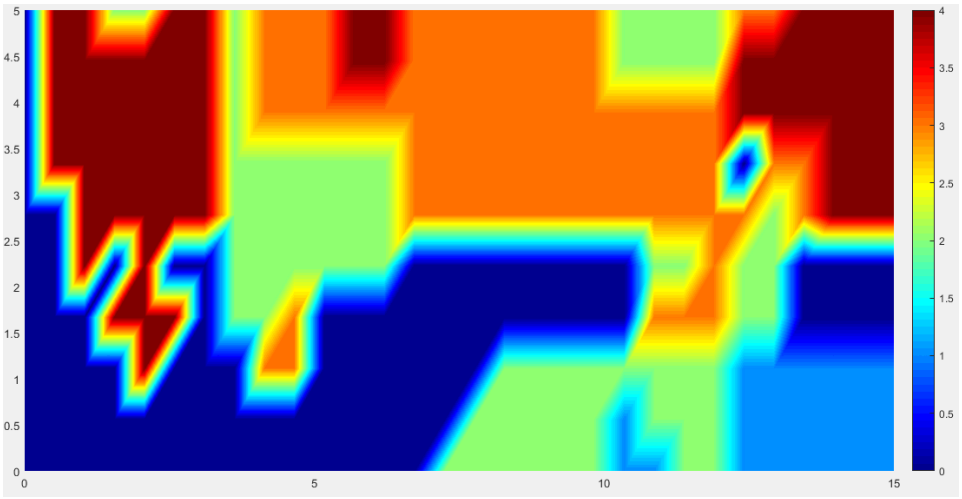
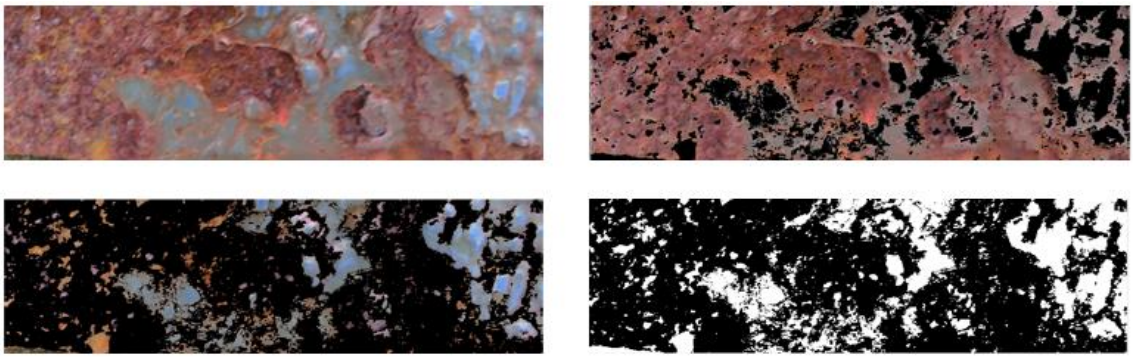


IMAGEN 2.9



B9=

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

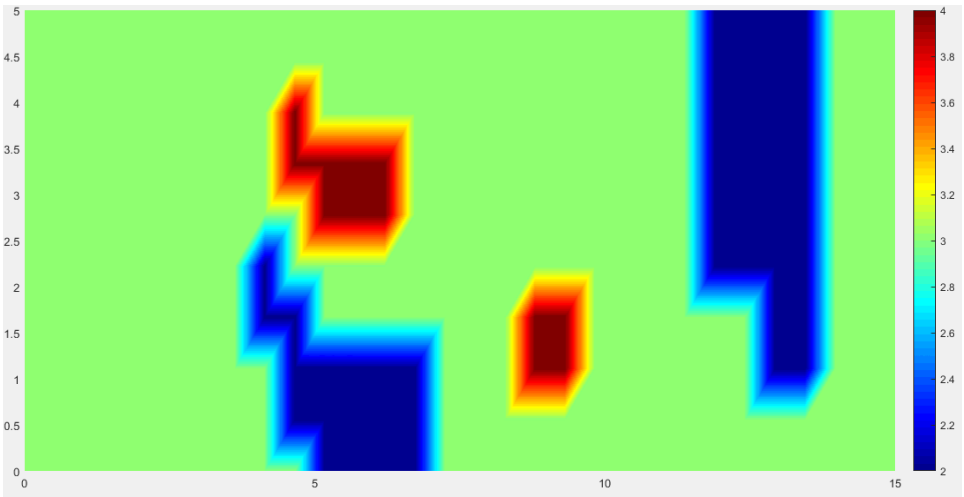
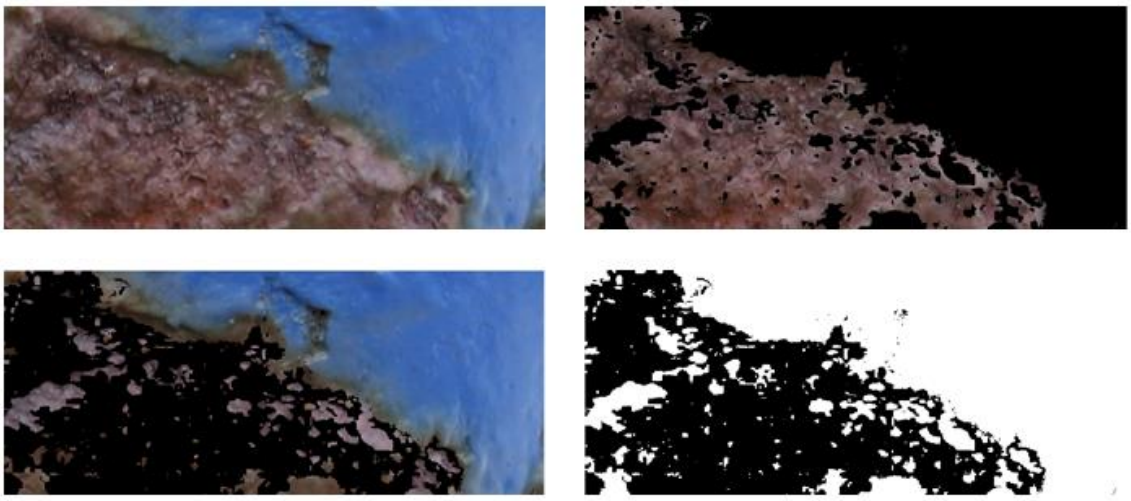


IMAGEN 2.10



B10=

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	0	0

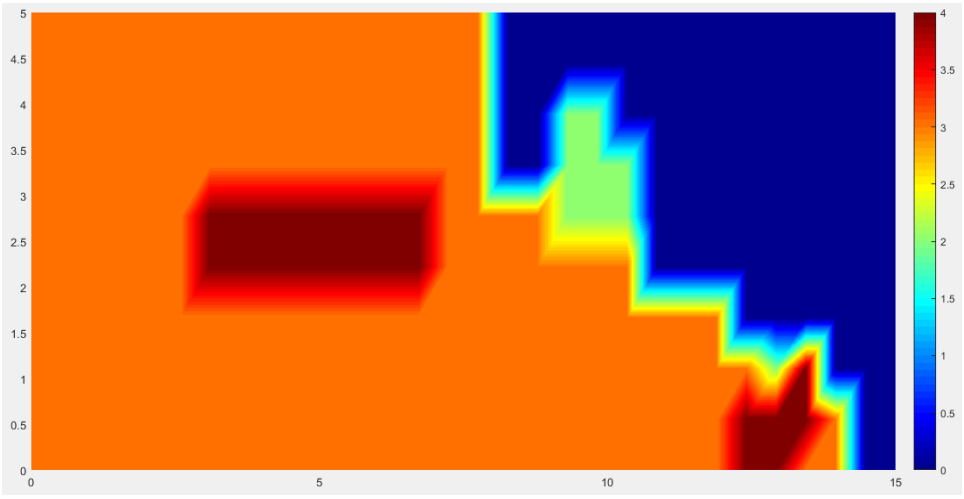
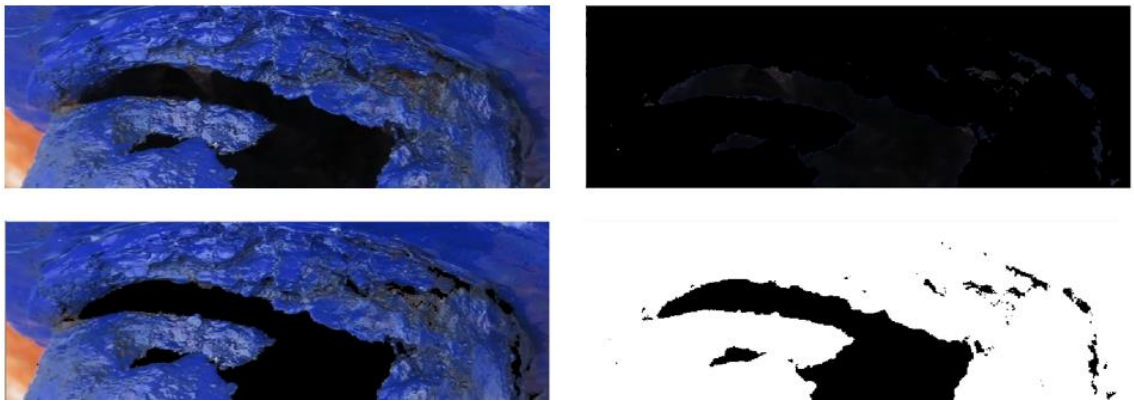


IMAGEN 2.11



B11=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

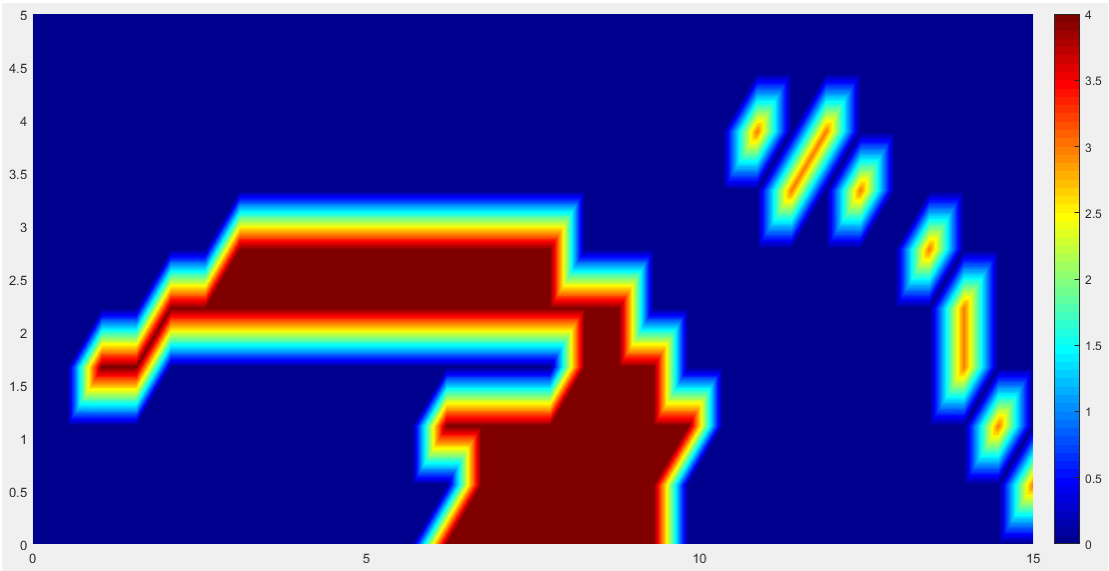
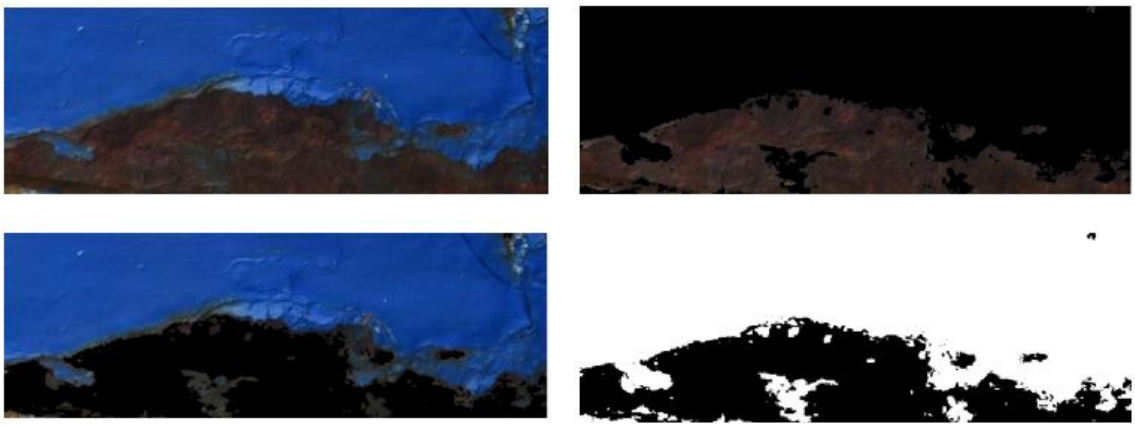


IMAGEN 2.12



B12=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	2	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	0	0	0	0	0	0
0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2	0	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

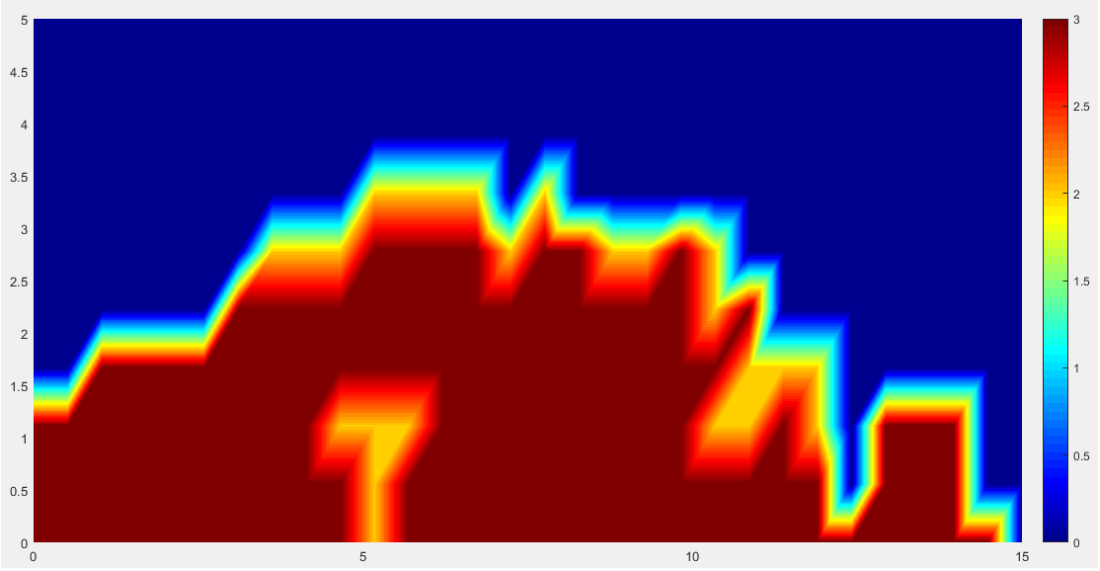
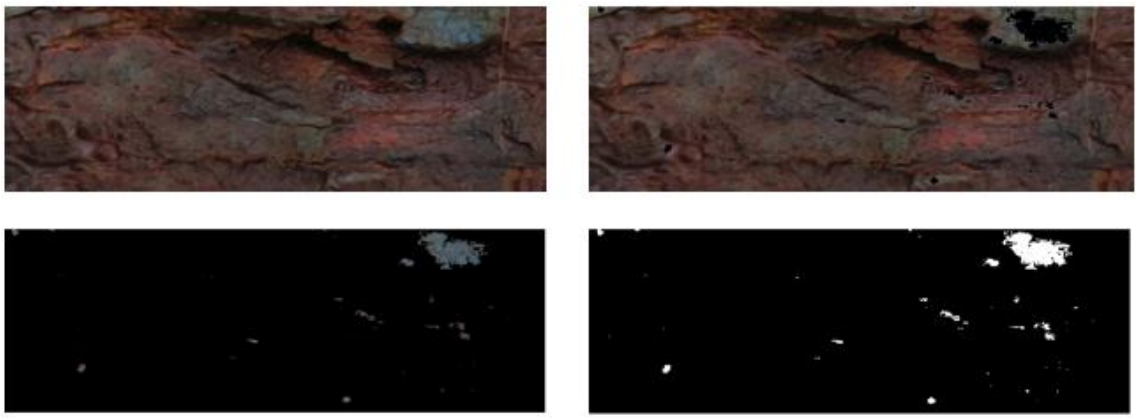


IMAGEN 2.13



B13=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

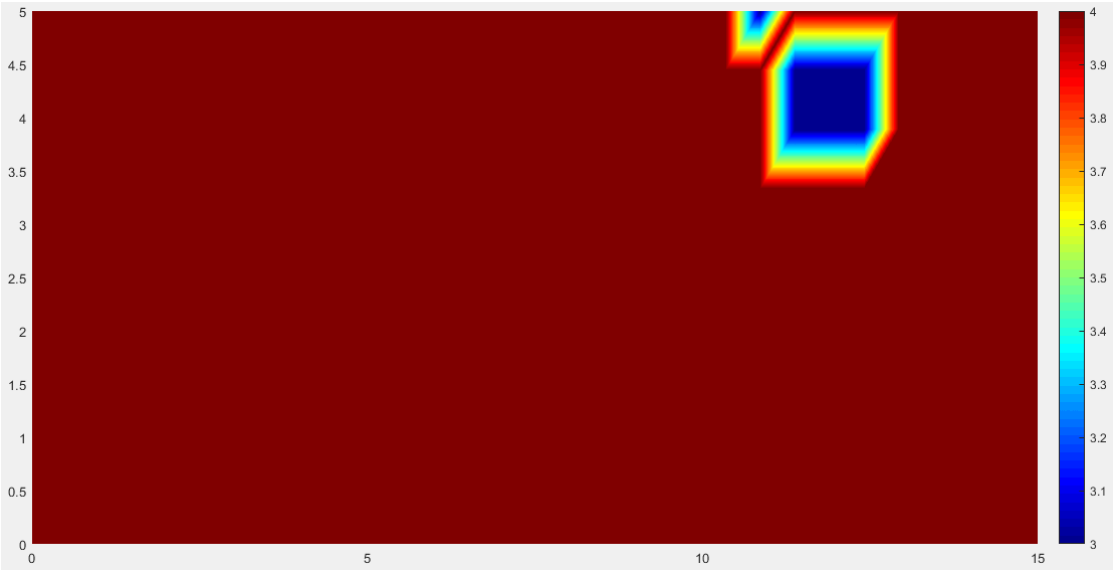
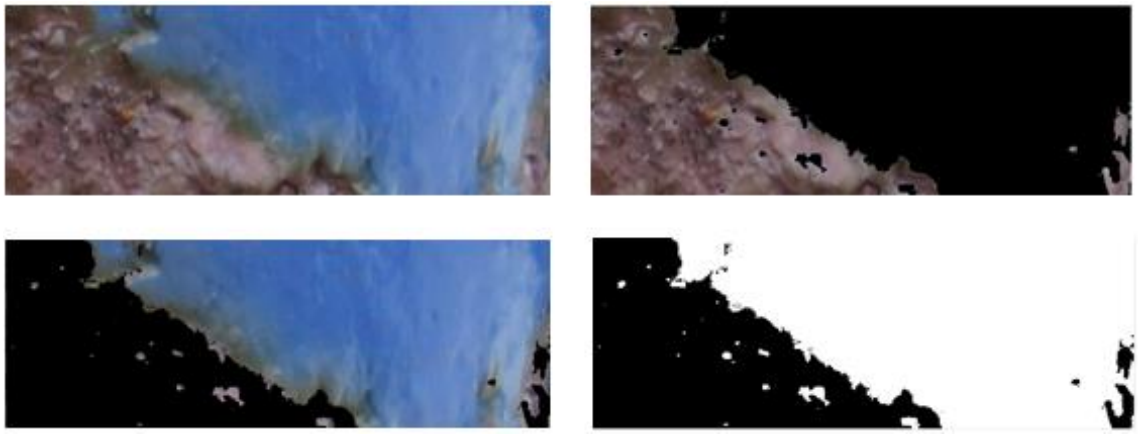


IMAGEN 2.14



B14=

3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4

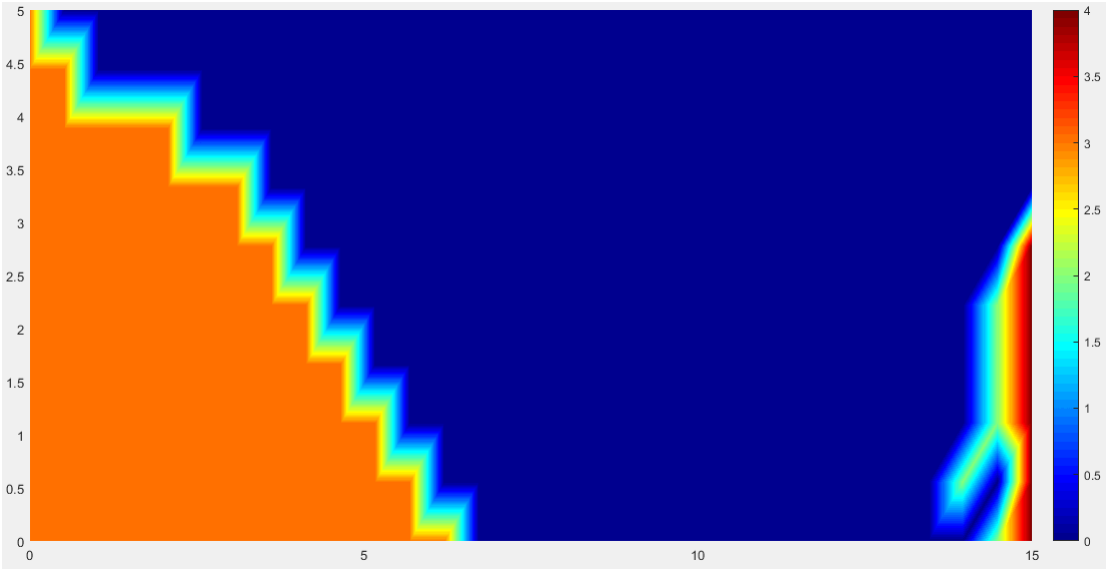
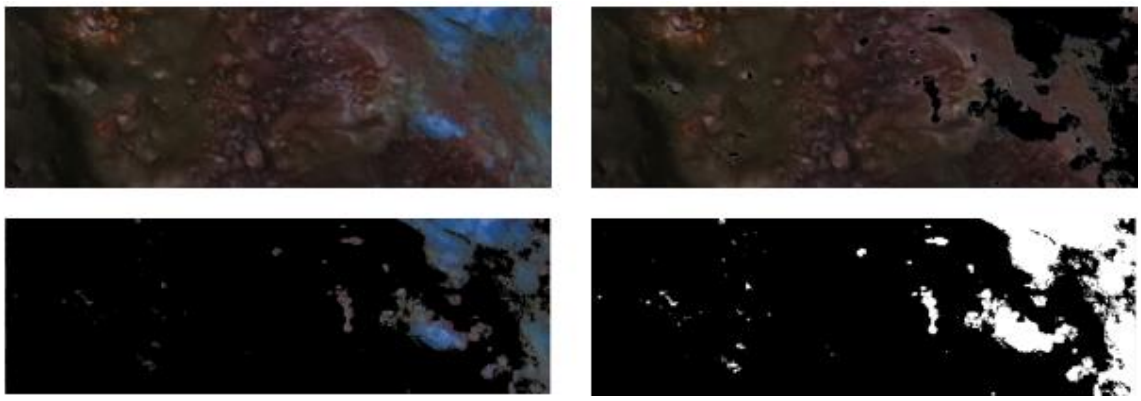


IMAGEN 2.15



B15=

3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3
3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
3	3	3	4	4	3	3	3	4	4	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2
3	3	3	4	4	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2

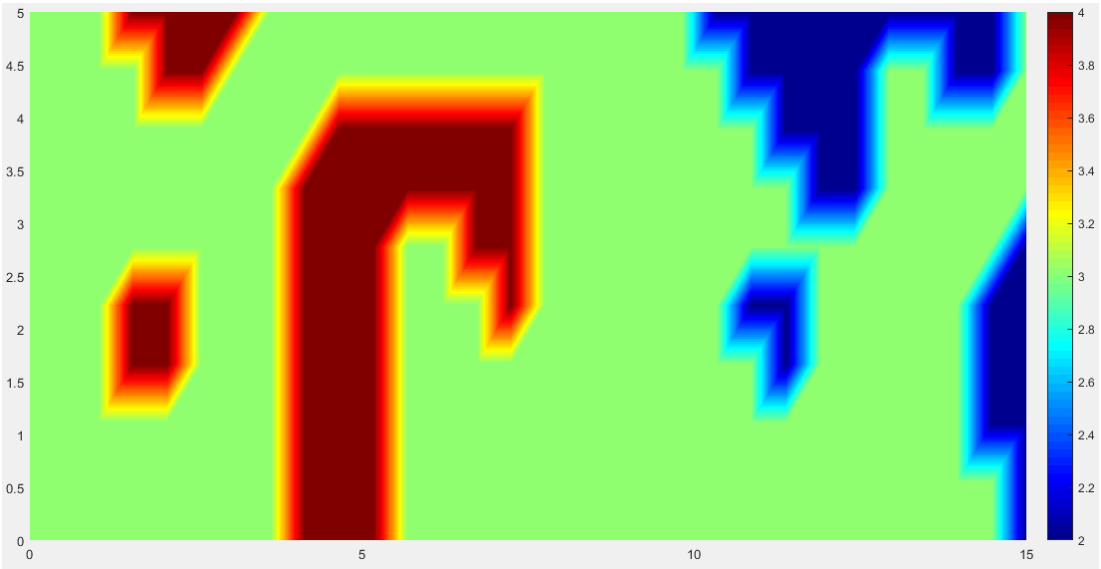
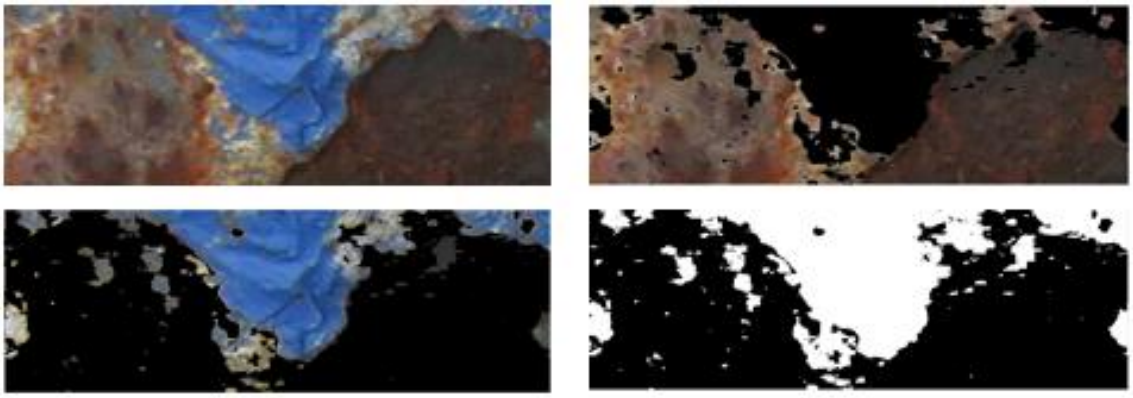


IMAGEN 2.16



B16=

3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	2	2	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	4	2	2	2	0	0	0	0	2	0
3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	0	0	1	1	0	0	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

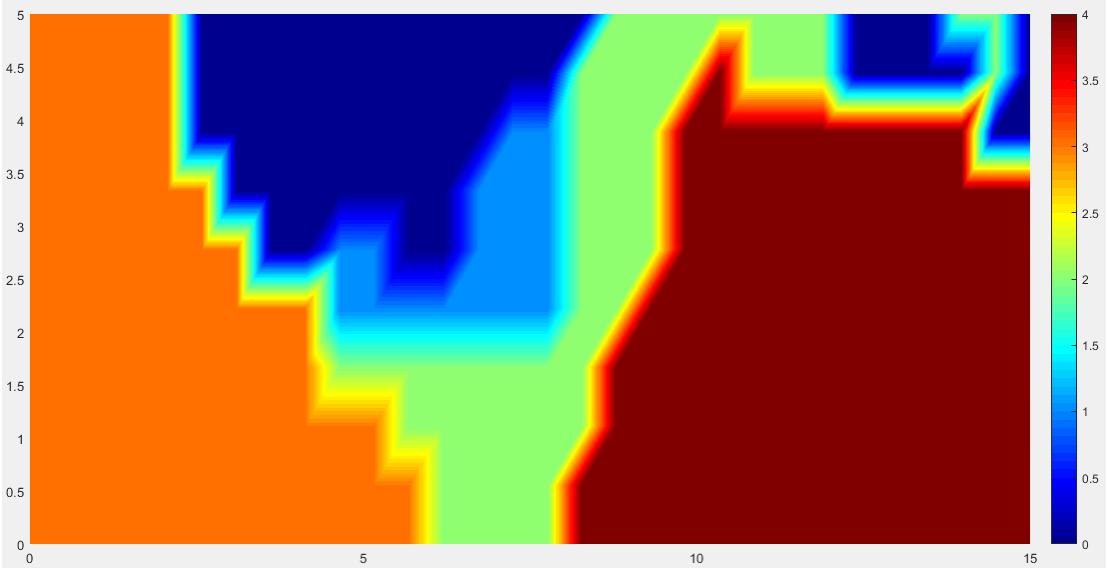
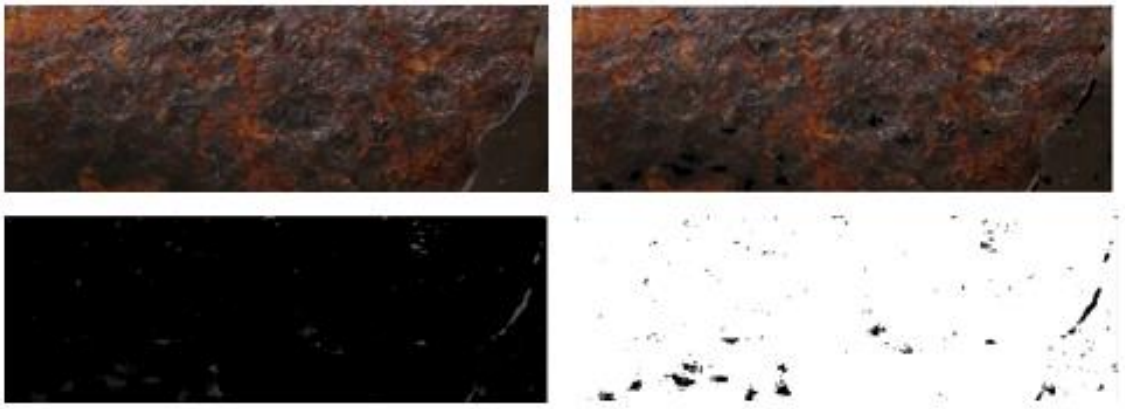


IMAGEN 2.17



B17=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

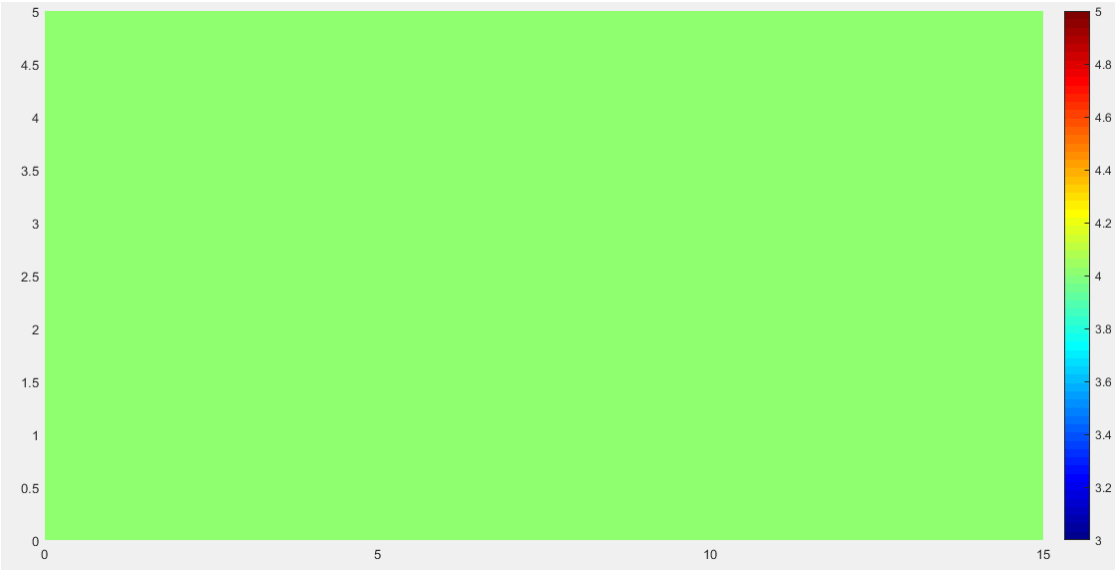
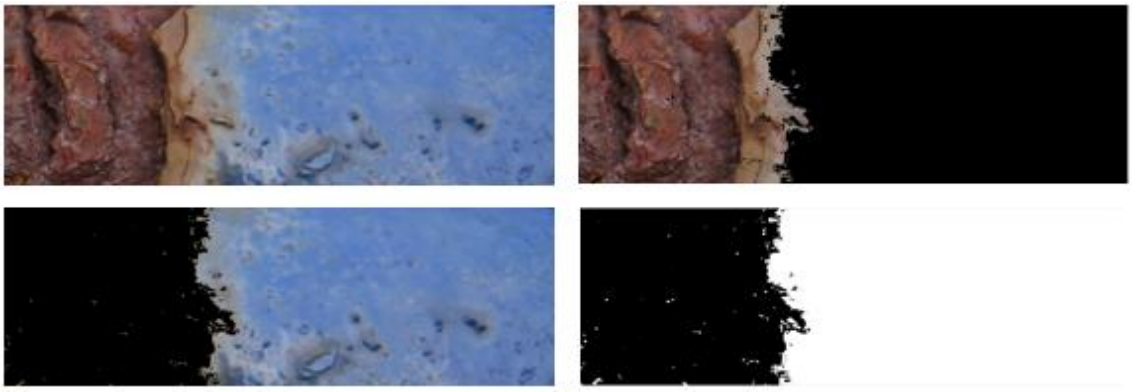


IMAGEN 2.18



B18=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

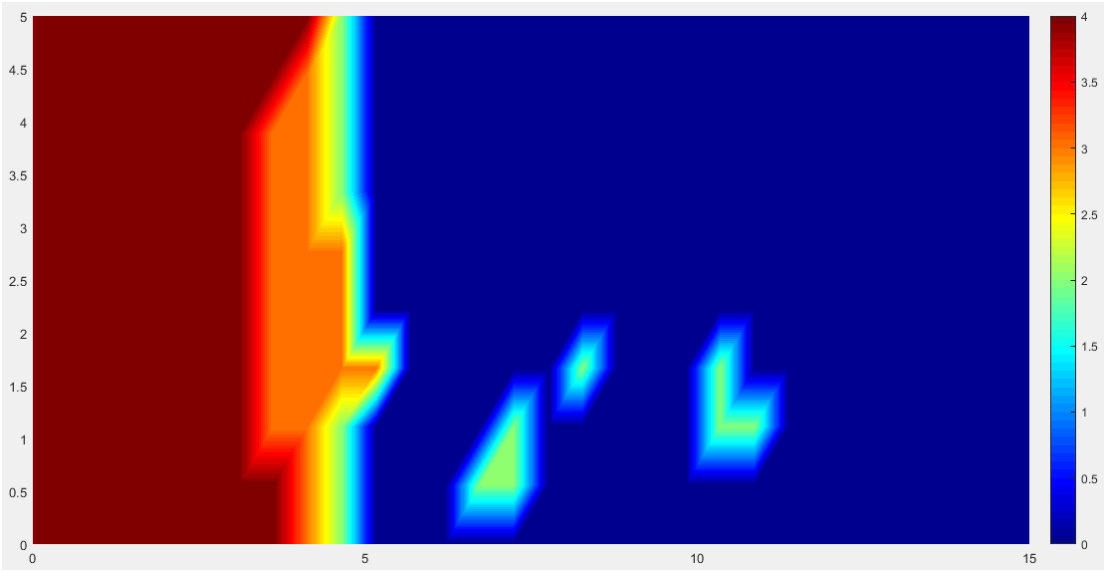
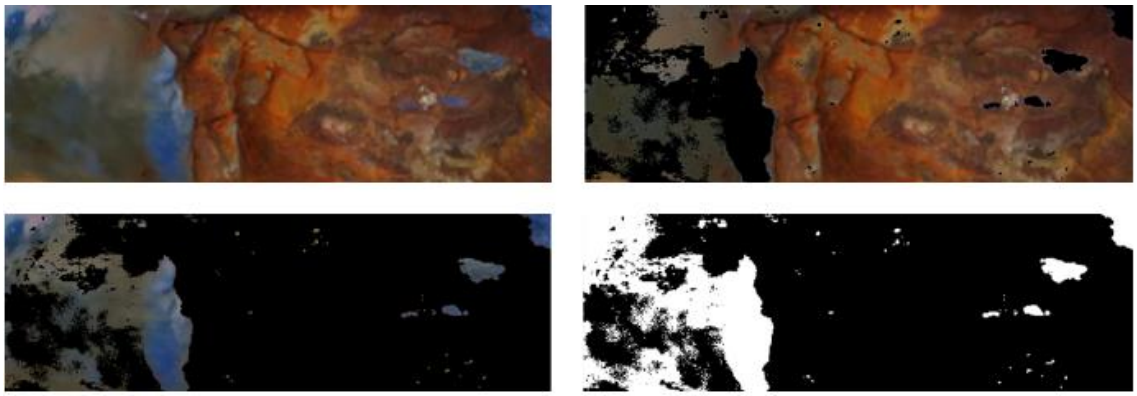


IMAGEN 2.19



B19=

2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0
2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0
2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	4	0	0	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

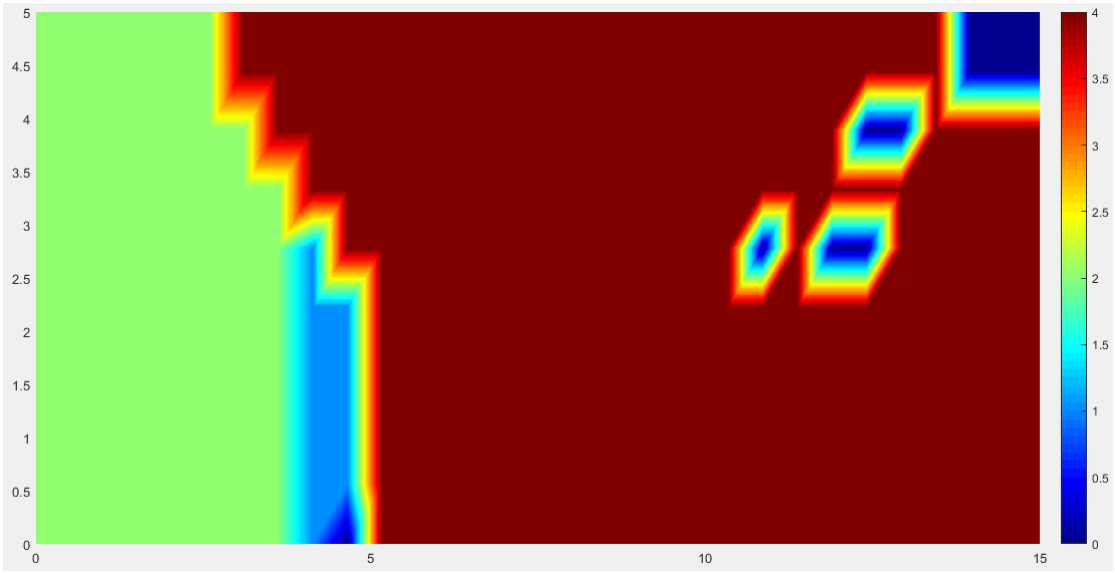


IMAGEN 2.20

B20=

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

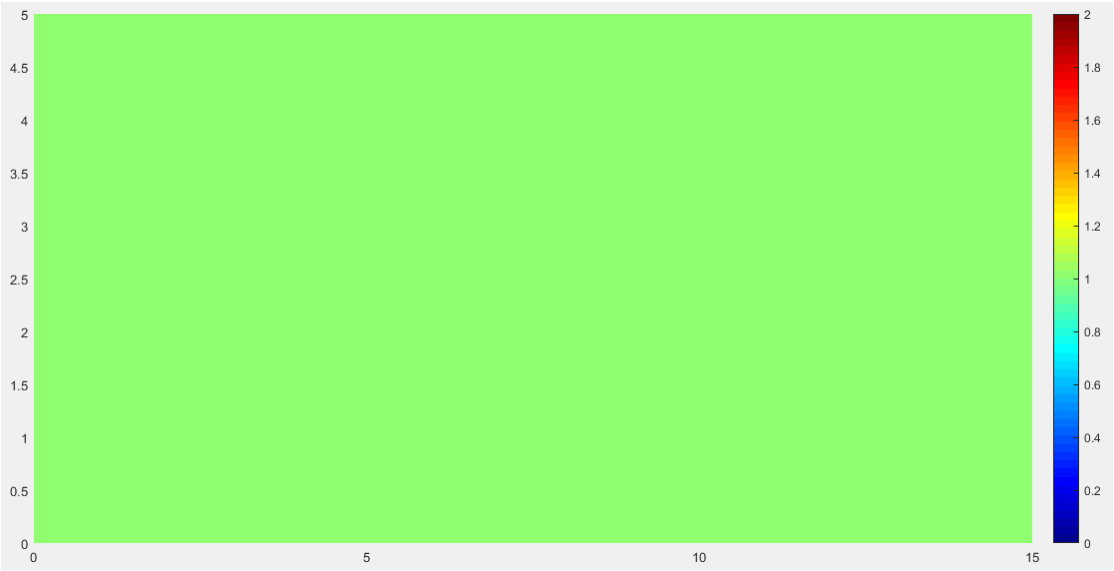
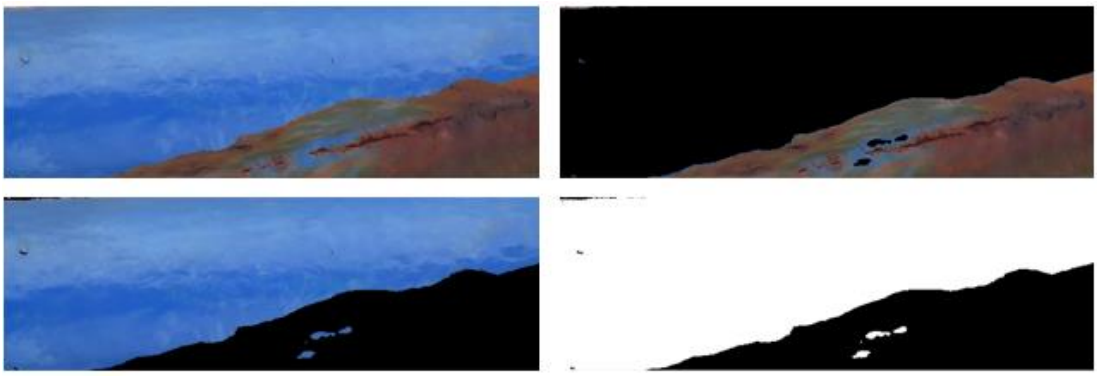


IMAGEN 2.21



B21=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	3	3	2	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	4	3	3	2	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	4	4	4	3	2	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	3	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

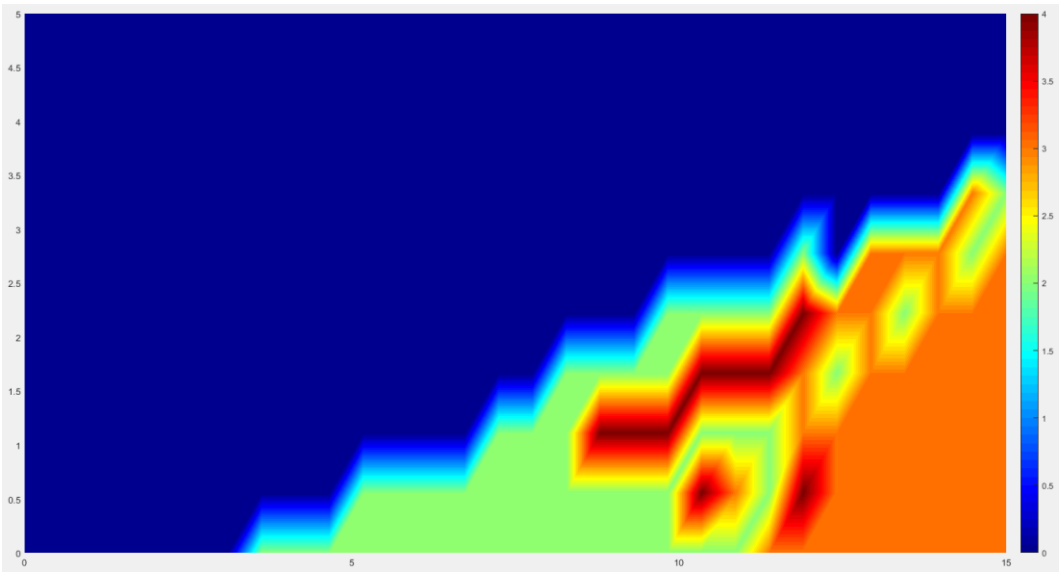
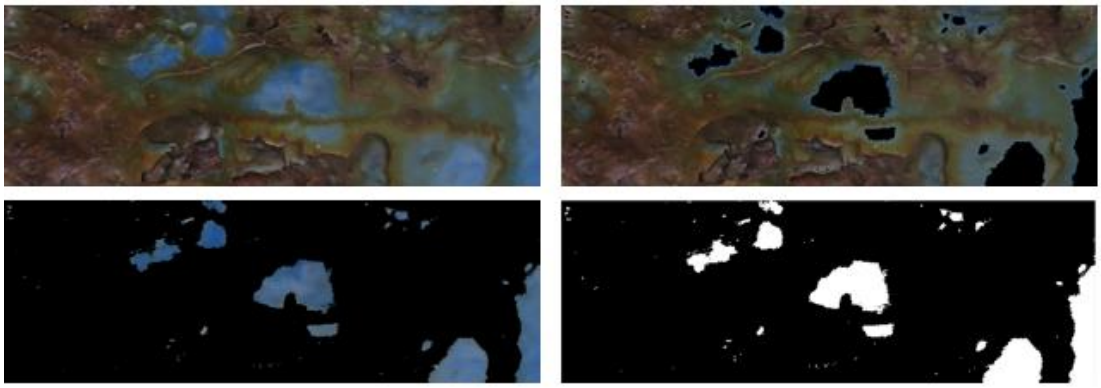


IMAGEN 2.21



B22=

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0
3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	3	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	3	3	3	3	0	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	3	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	3	0
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	3	0

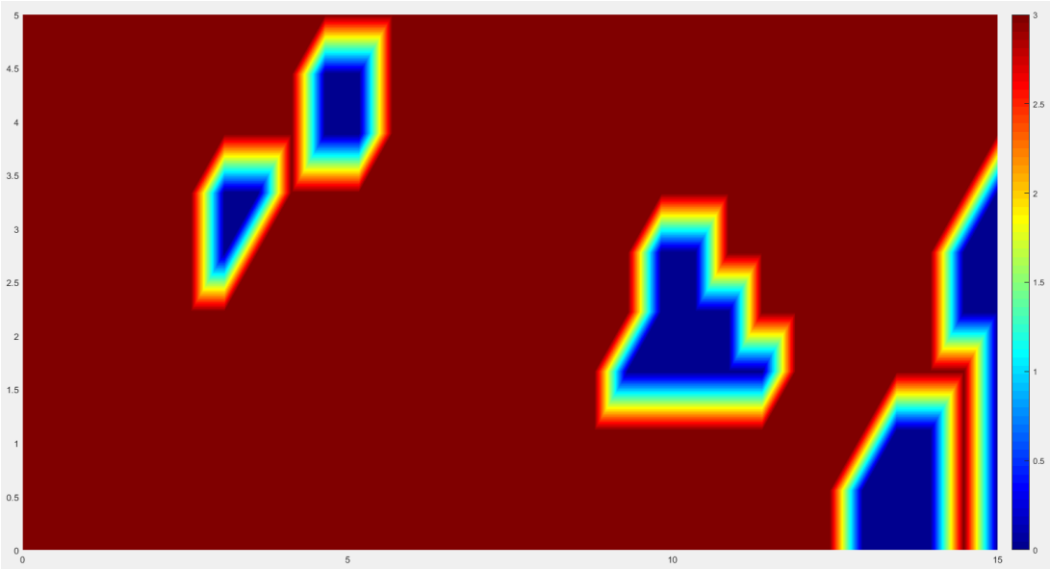
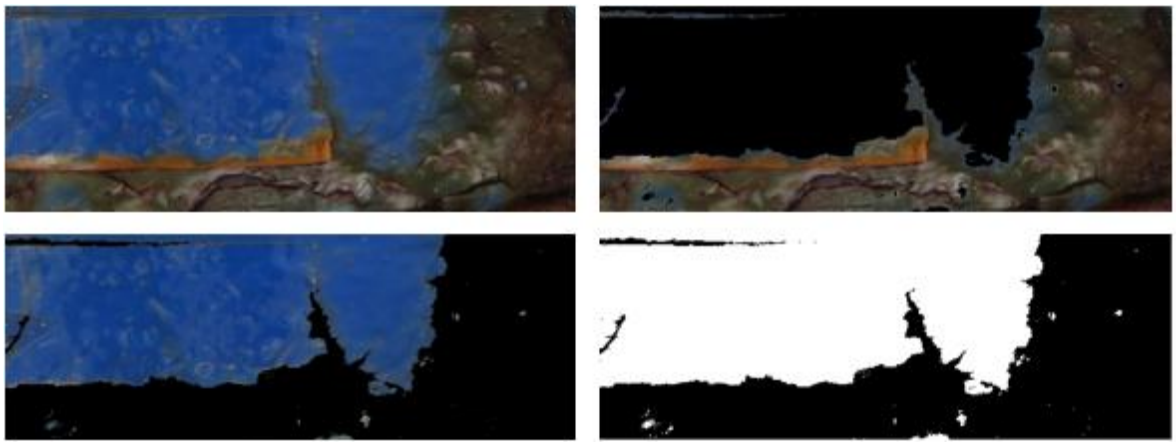


IMAGEN 2.23



B23=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4
1	1	3	2	2	2	3	0	4	4	4	4	4	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
1	1	2	3	2	2	3	4	4	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4

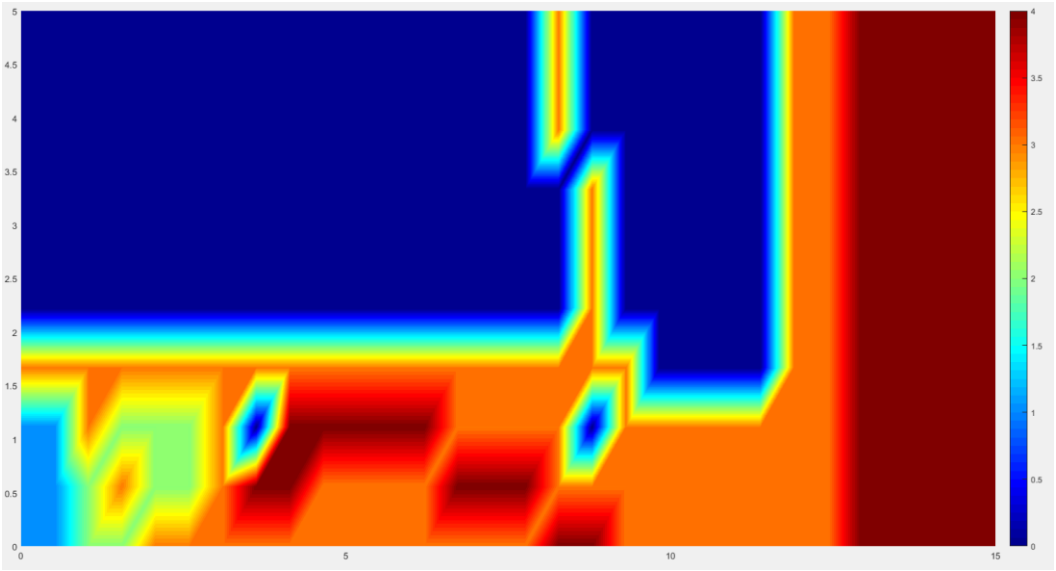
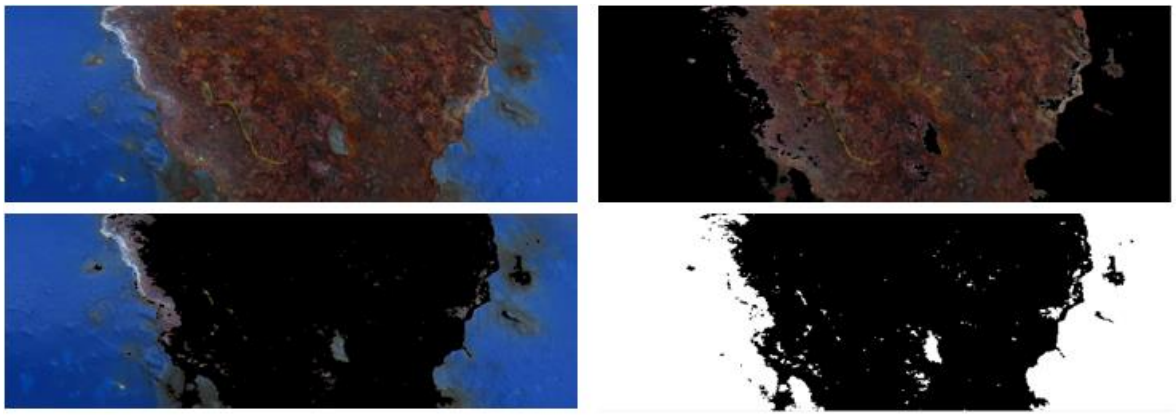


IMAGEN 2.24



B24=

0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0
0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0
0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0
0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0

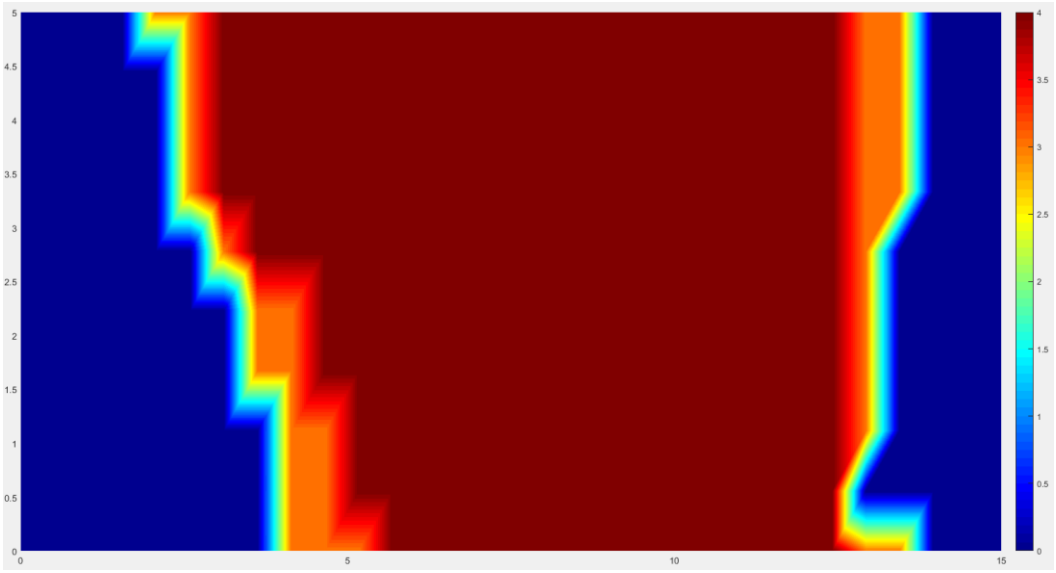
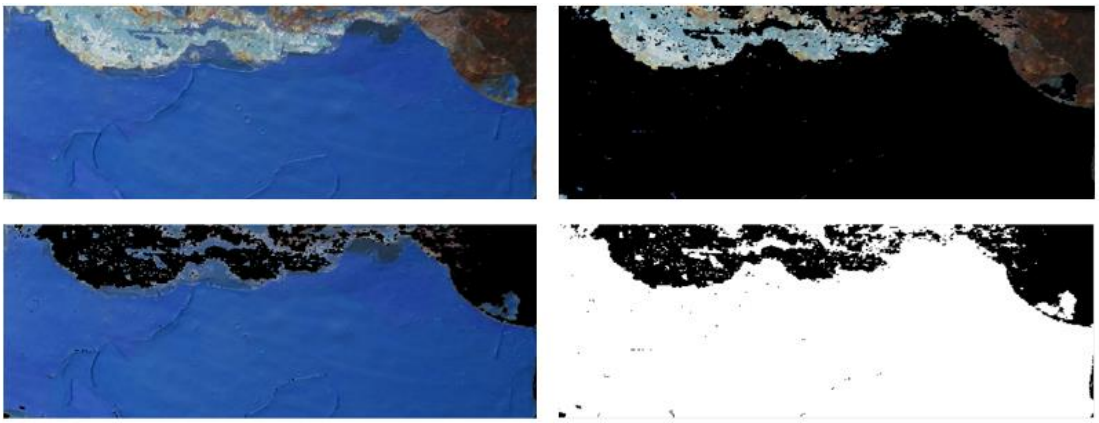


IMAGEN 2.25



B25=

1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
0	0	0	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

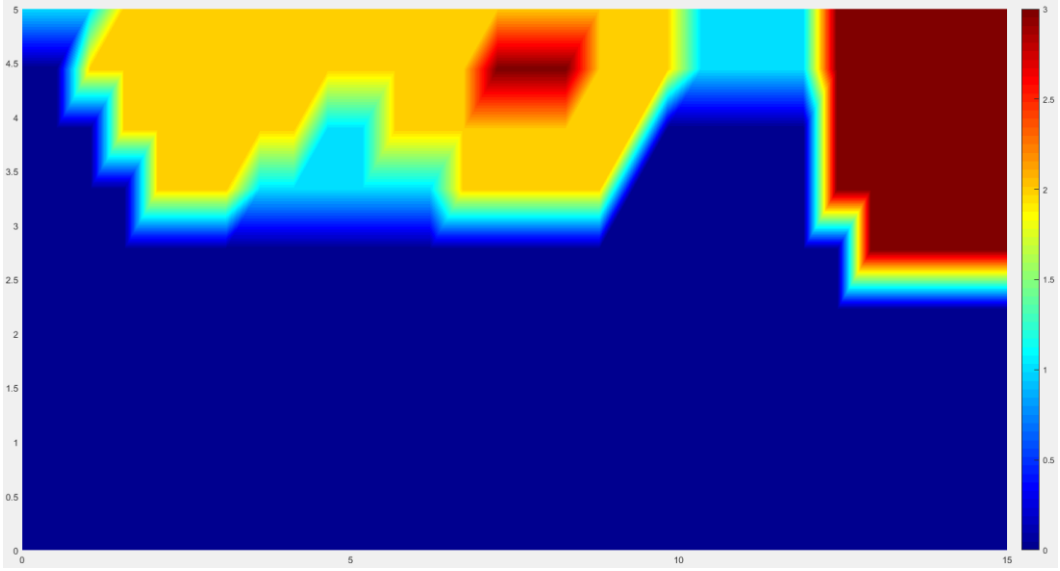
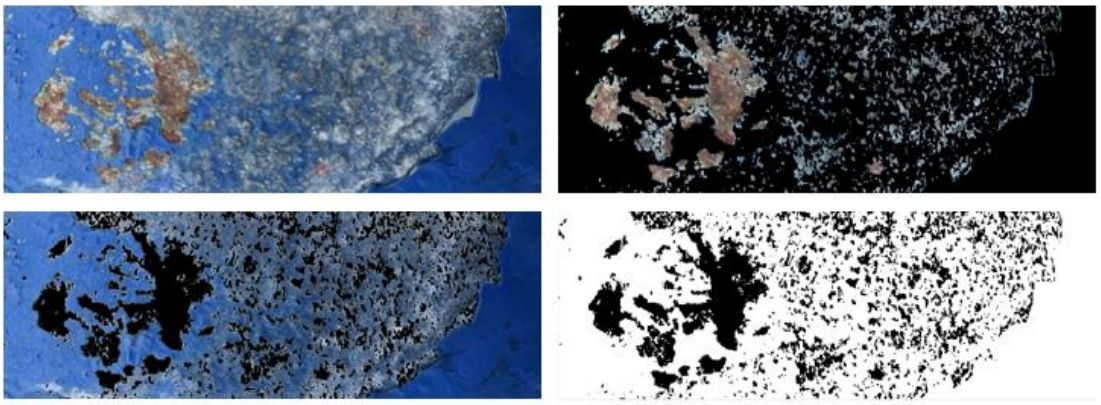


IMAGEN 2.26



B26=

0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	0	2	0	0	0	0	0	2	2	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	2	2	0	0	0	0	2	2	2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	2	2	0	0	0	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0

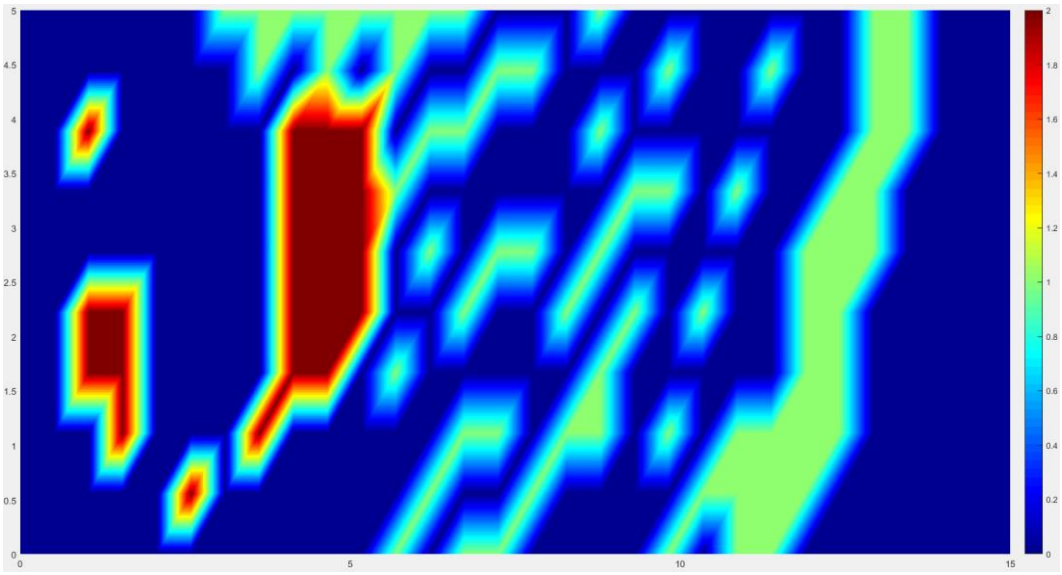
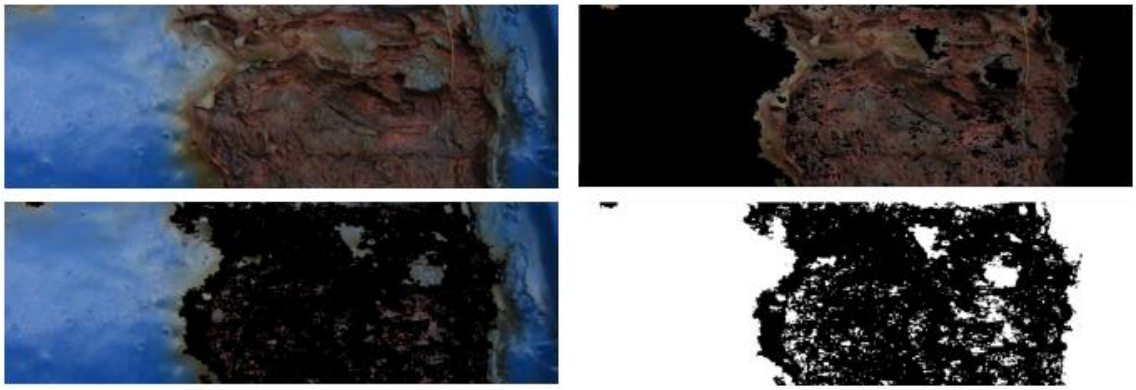


IMAGEN 2.27



B27=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4	4	4	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	2	2	4	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	4	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0

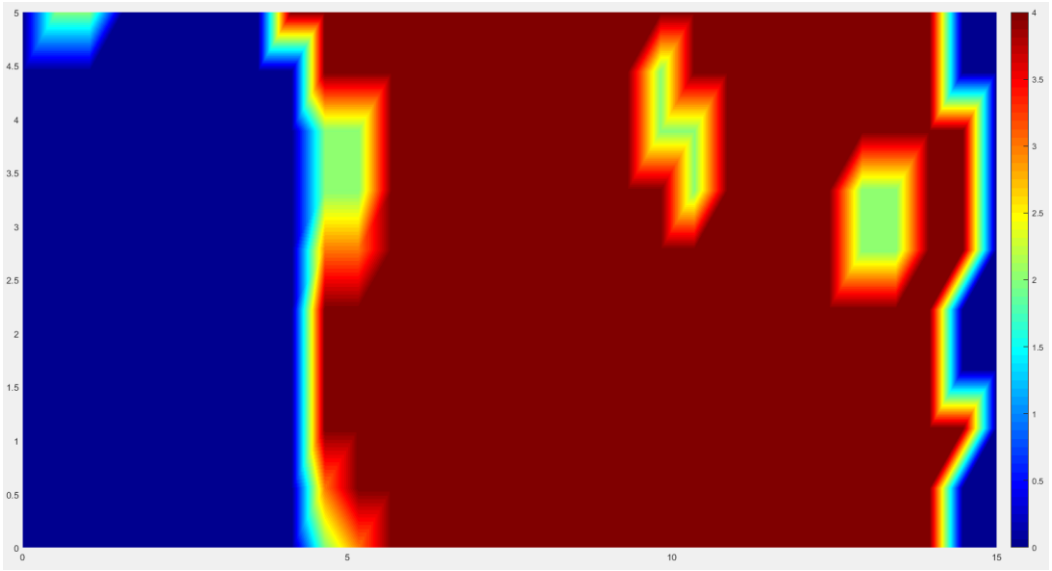
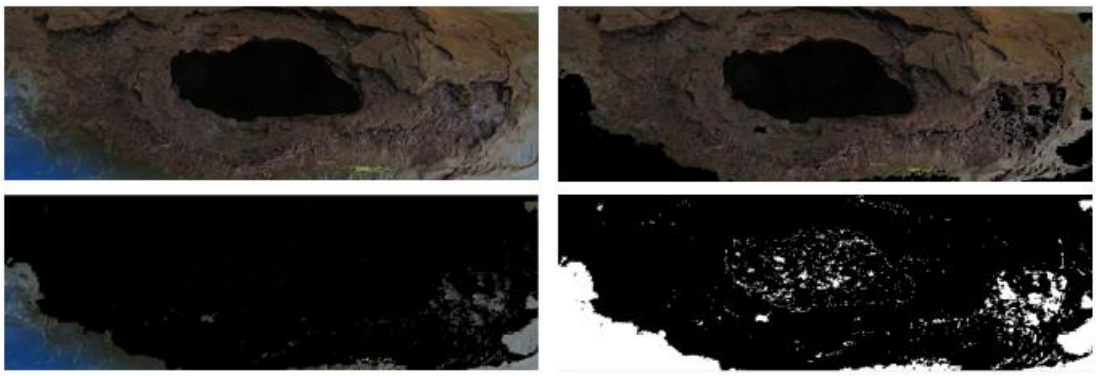


IMAGEN 2.28



B28=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2
2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2
0	0	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2
0	0	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2

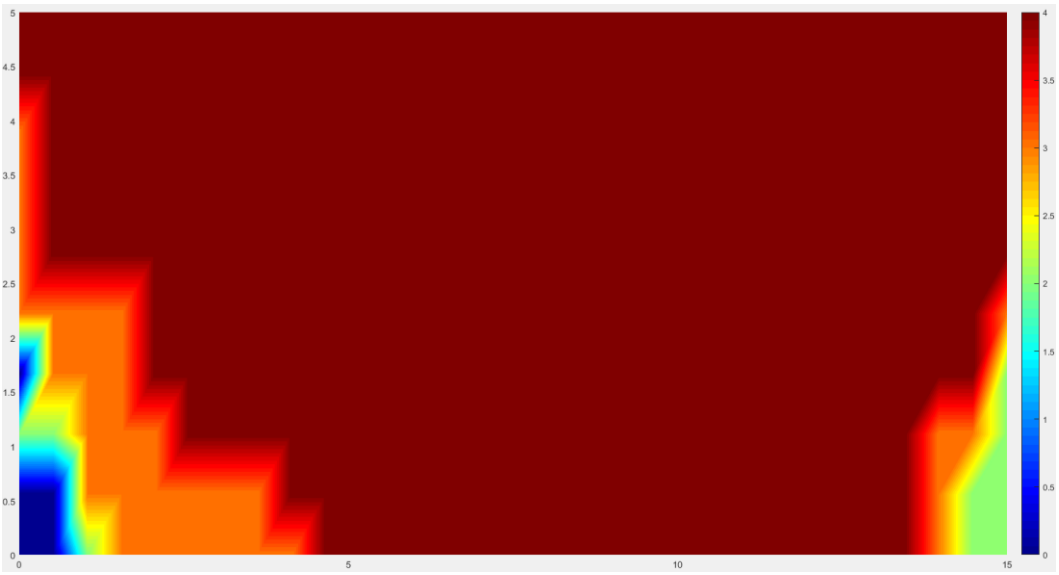
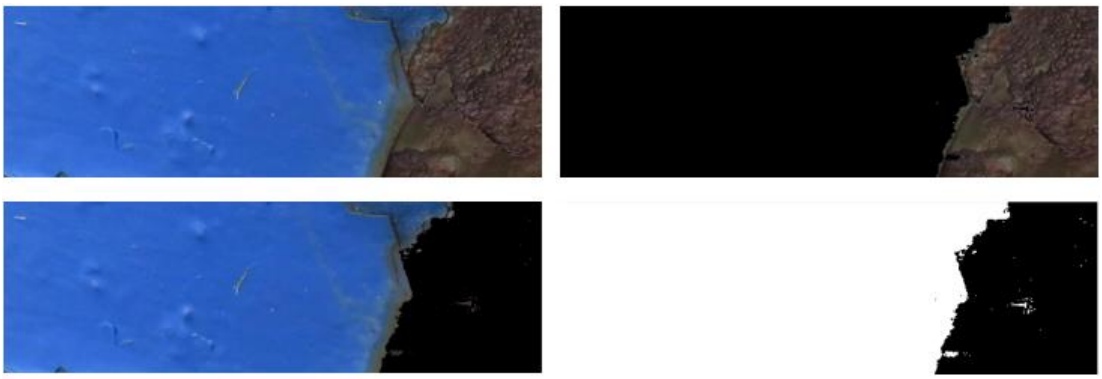


IMAGEN 2.29



B29=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	3	2	2	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4

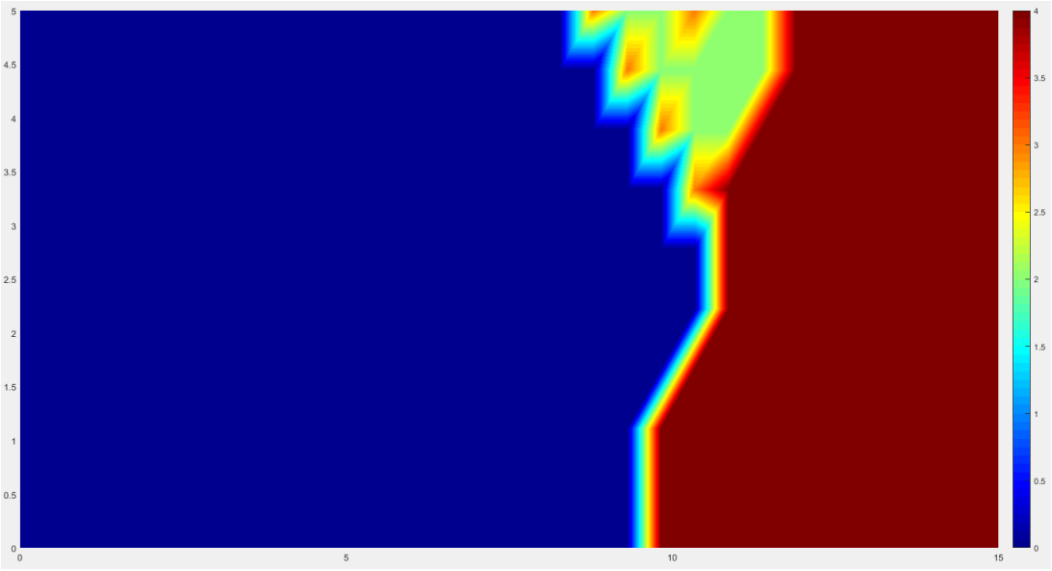
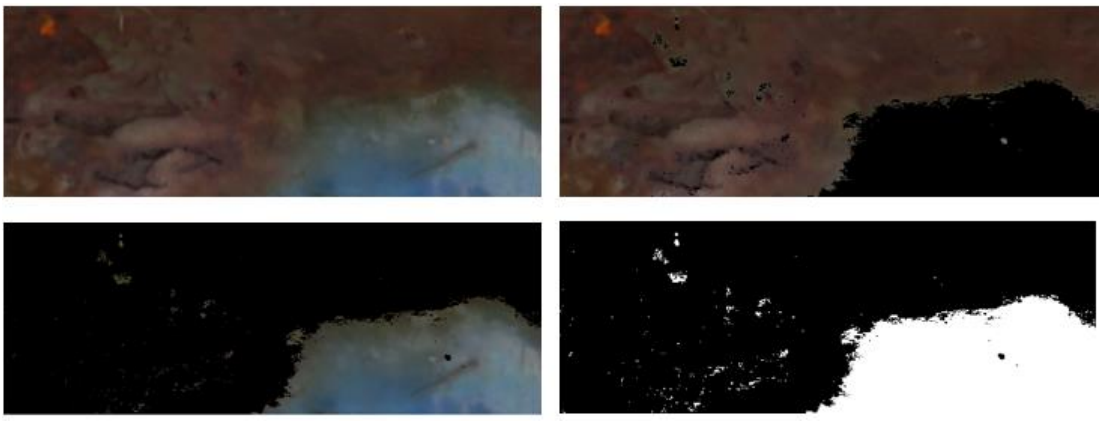
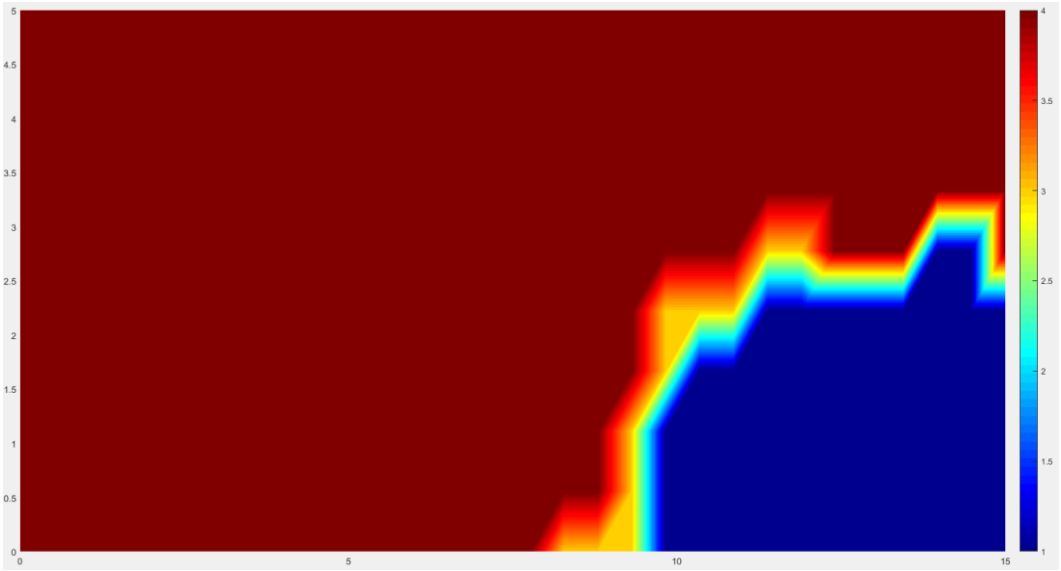


IMAGEN 2.30



B30=

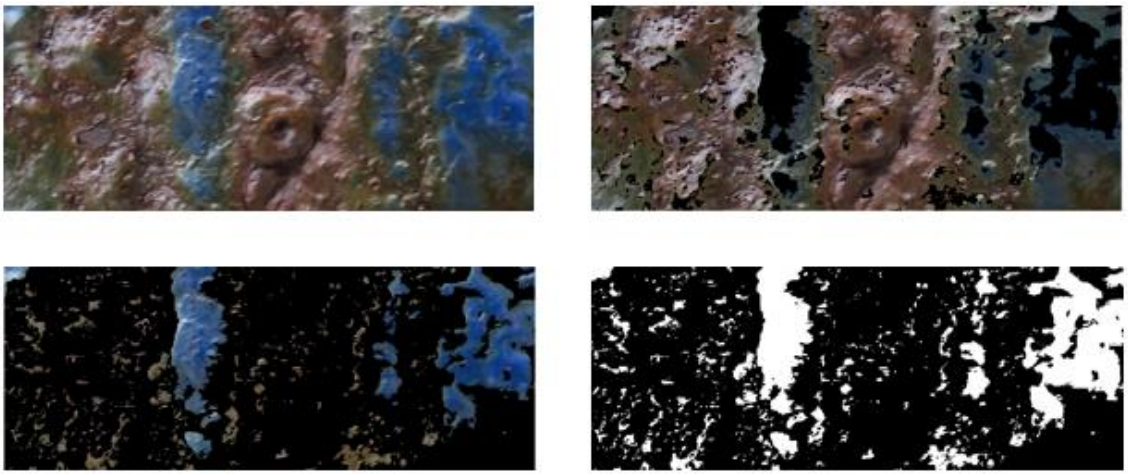
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	1	1	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1



ZONA 3

ZONA 3

IMAGEN 3.1



C1=

3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3

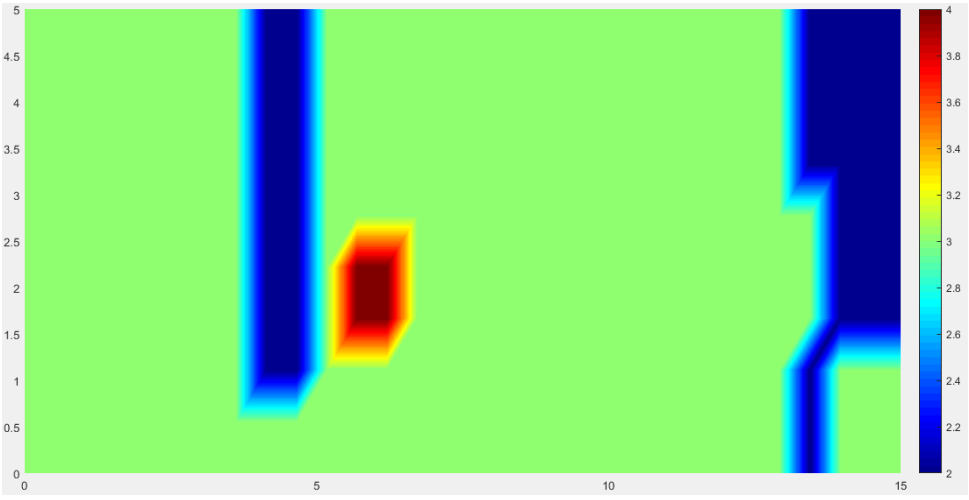
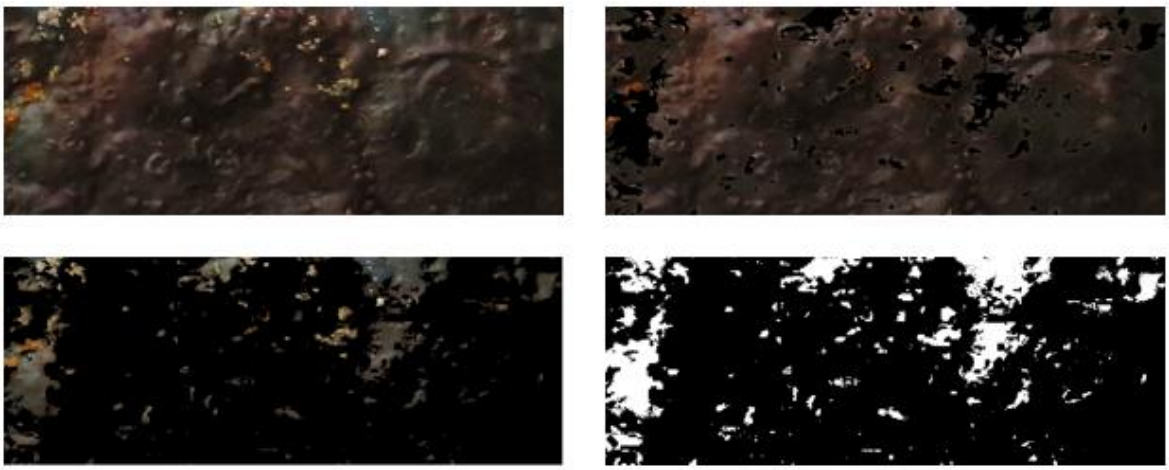
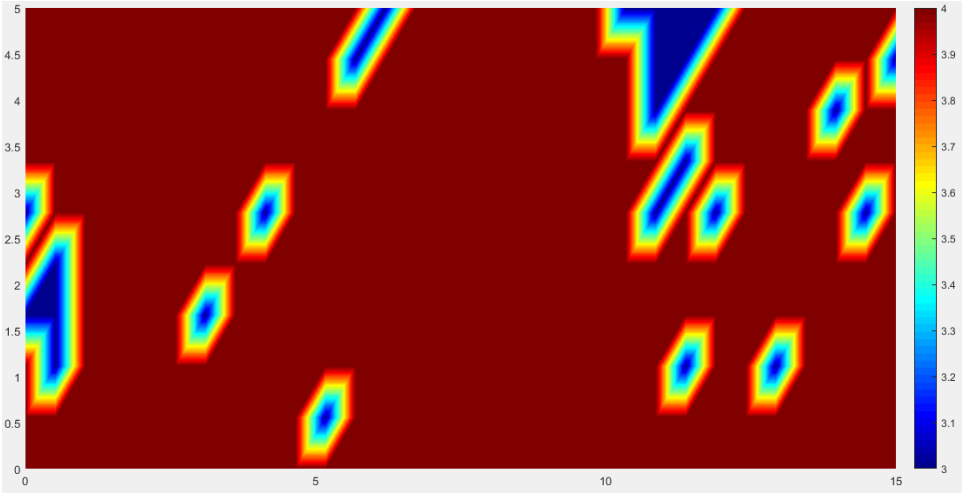


IMAGEN 3.2

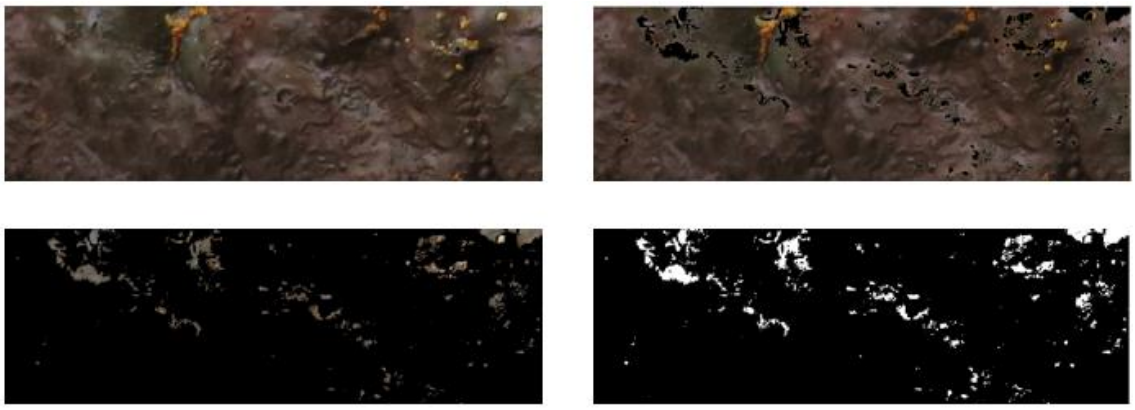


C2=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	3	4		
4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4



MAGEN 3.3



C3=

4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4
4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	3	3	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

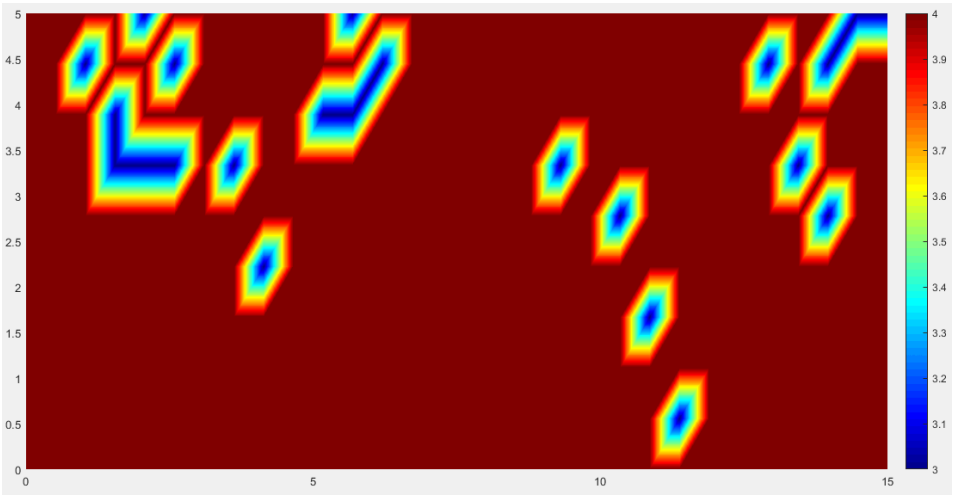
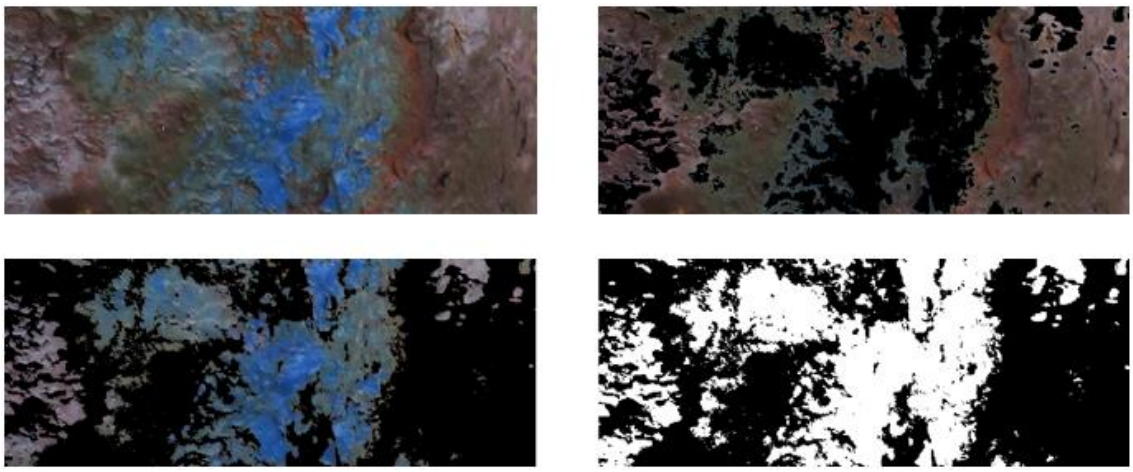


IMAGEN 3.4



C4=

3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	2	4	4	2	3	3	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	4	4	3	3	3	3	2	4	2	4	4	3	3	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	3	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	2	3	2	3	2	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	3	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
4	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4

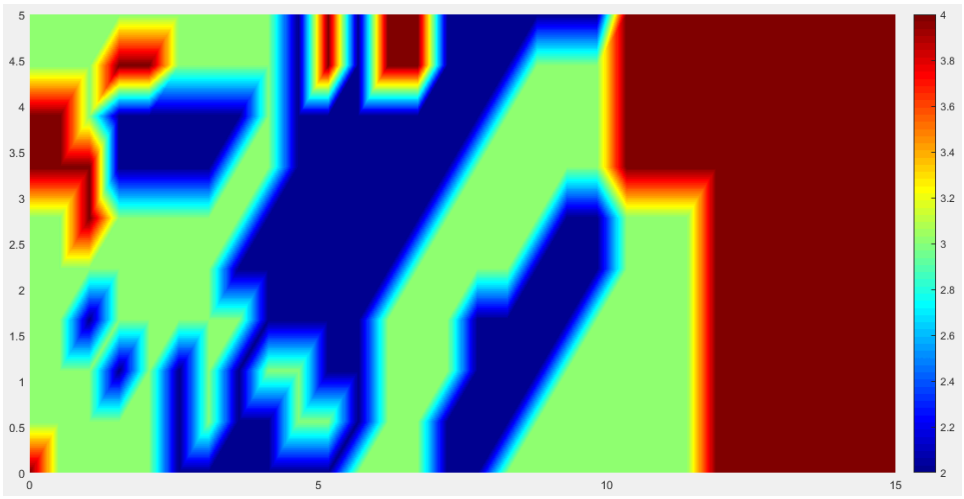
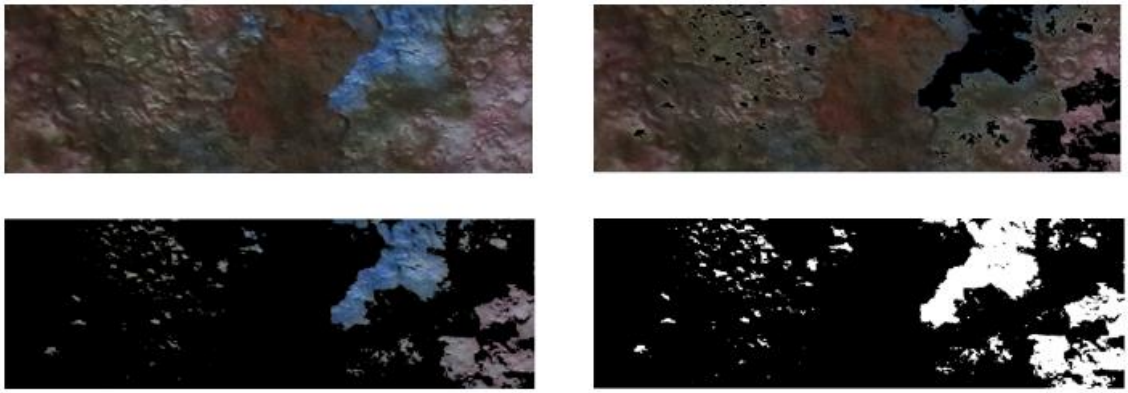


IMAGEN 3.5



C5=

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

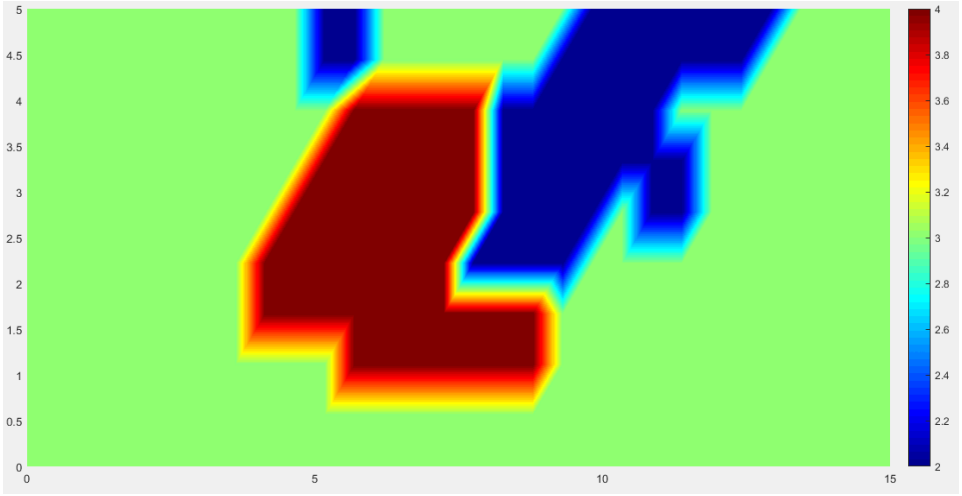
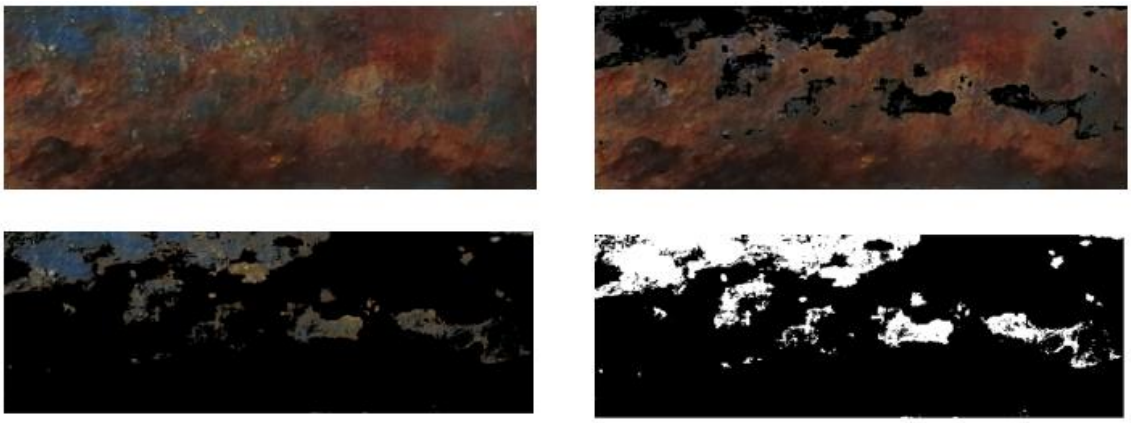


IMAGEN 3.6



C6=

2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3

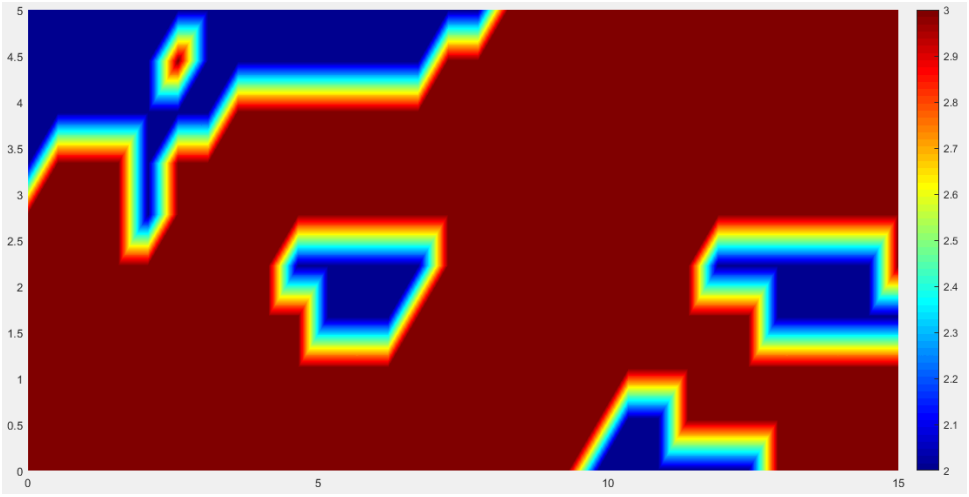
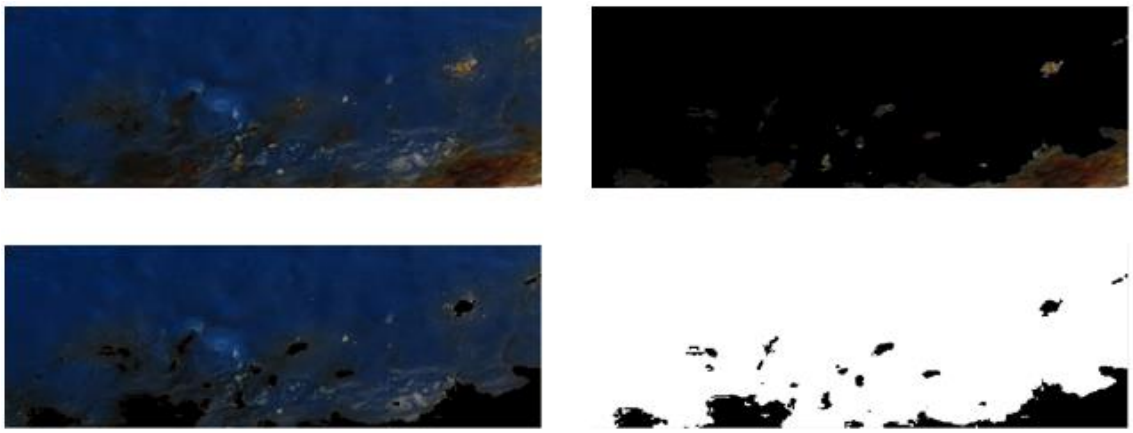


IMAGEN 3.7



C7=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3
0	0	2	2	2	0	0	2	2	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	0	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3

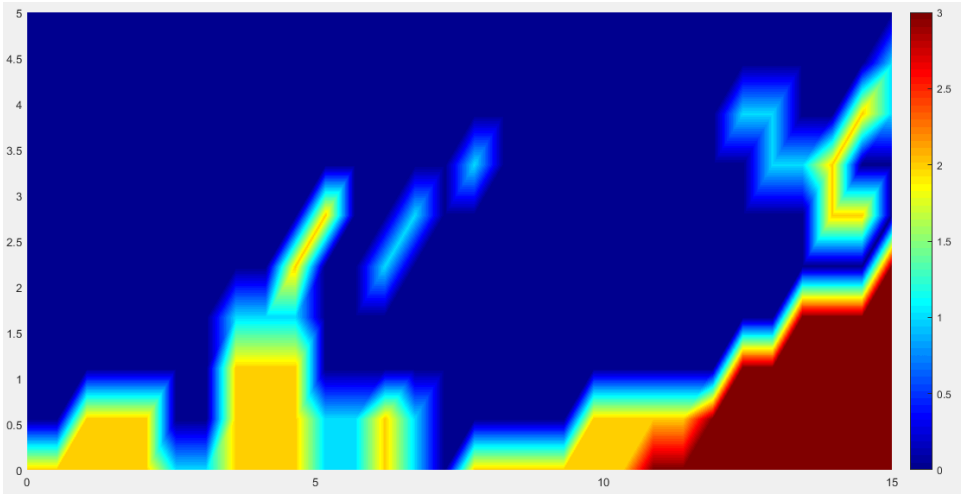
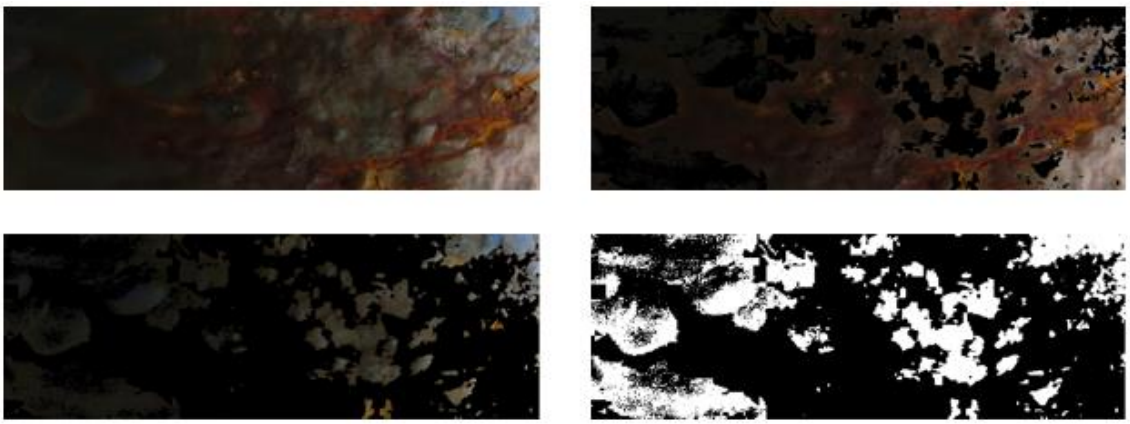


IMAGEN 3.8



C8=

3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
3	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3
3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3
3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
3	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

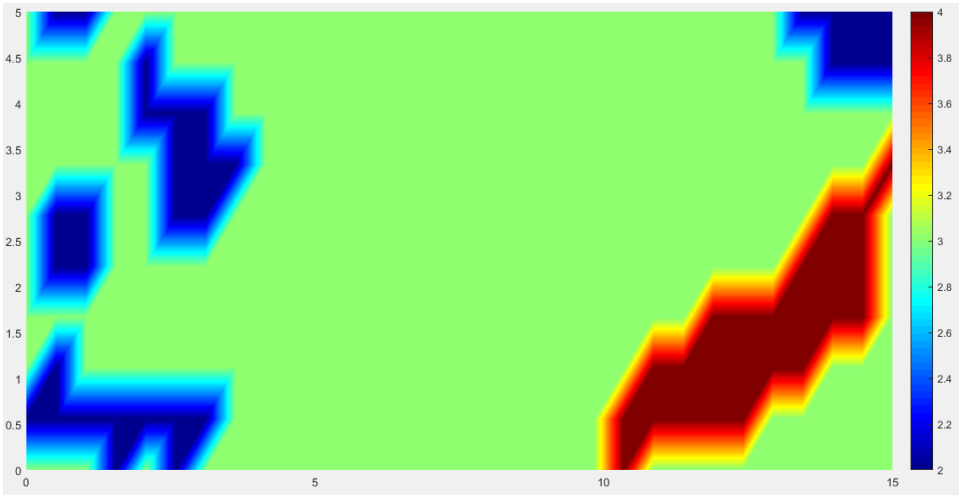
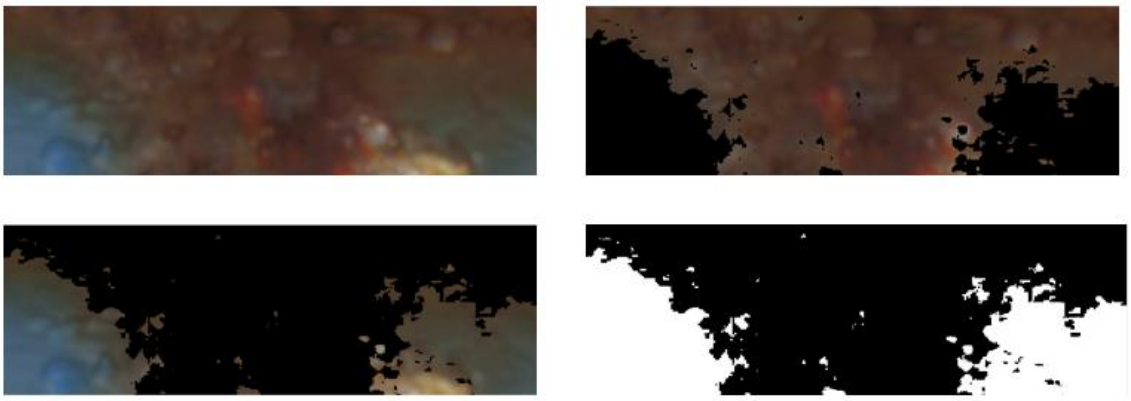


IMAGEN 3.9



C9=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3
2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	3	3	3
2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	2	2
1	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	3	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	3	3	3	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2

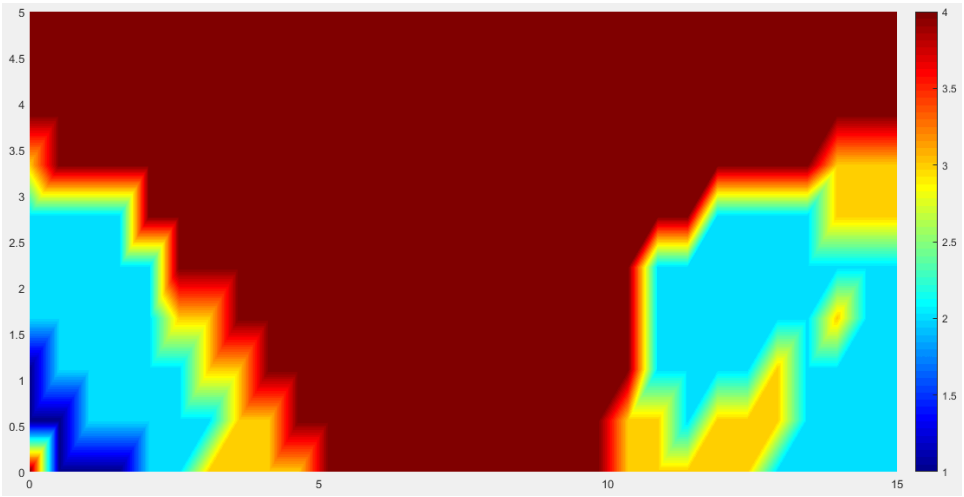
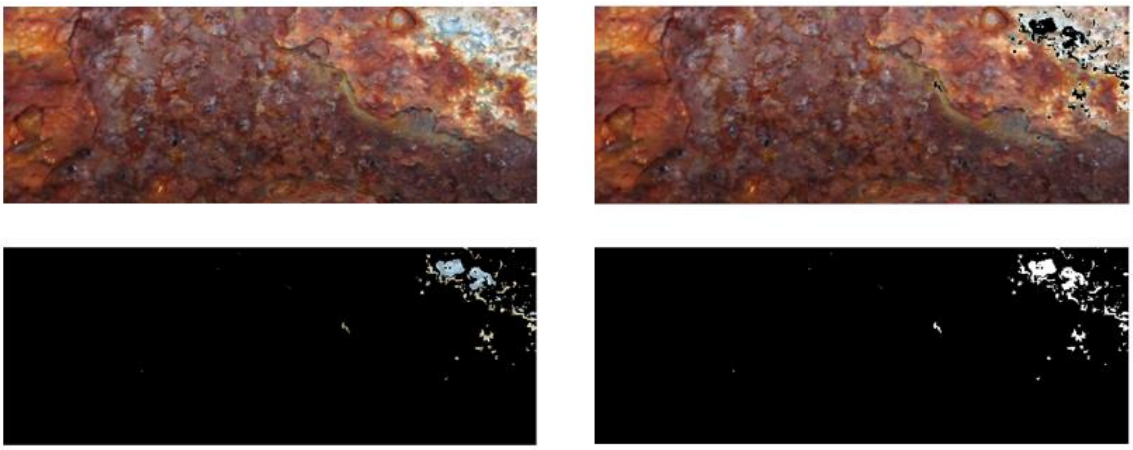


IMAGEN 3.10



C10=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	3	4	4	4	2	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	3	2	3	2
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	3	3	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

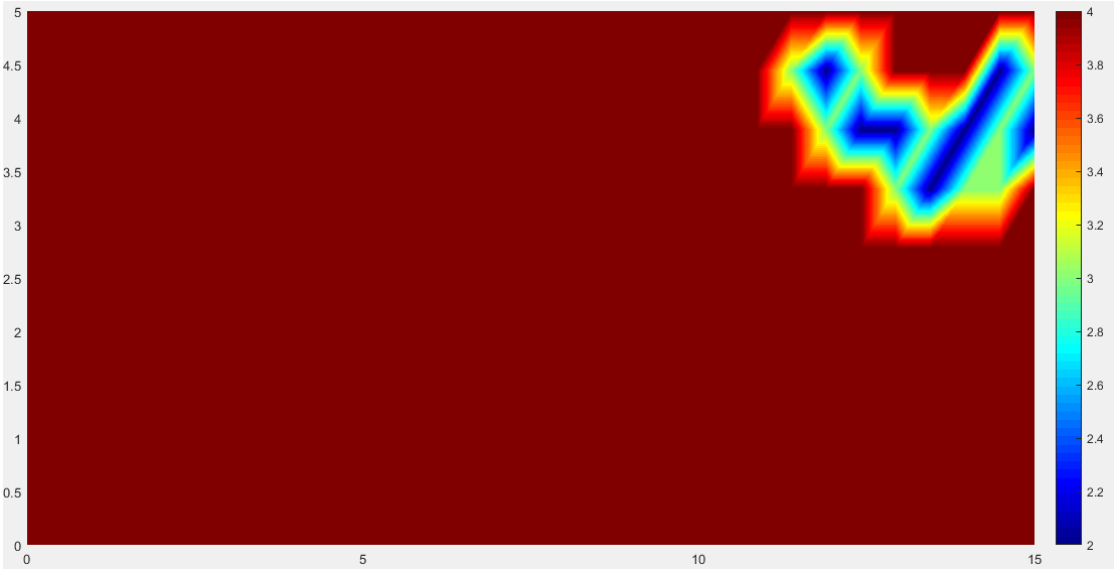
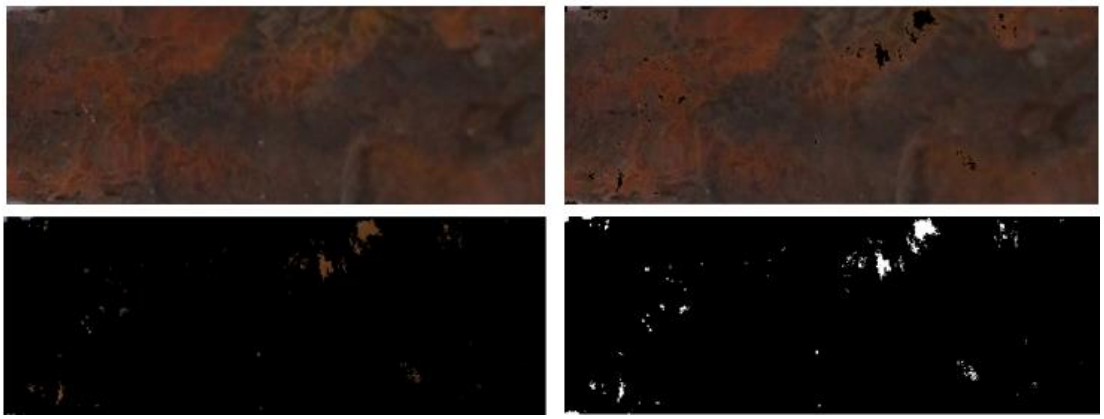


IMAGEN 3.11



C11=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

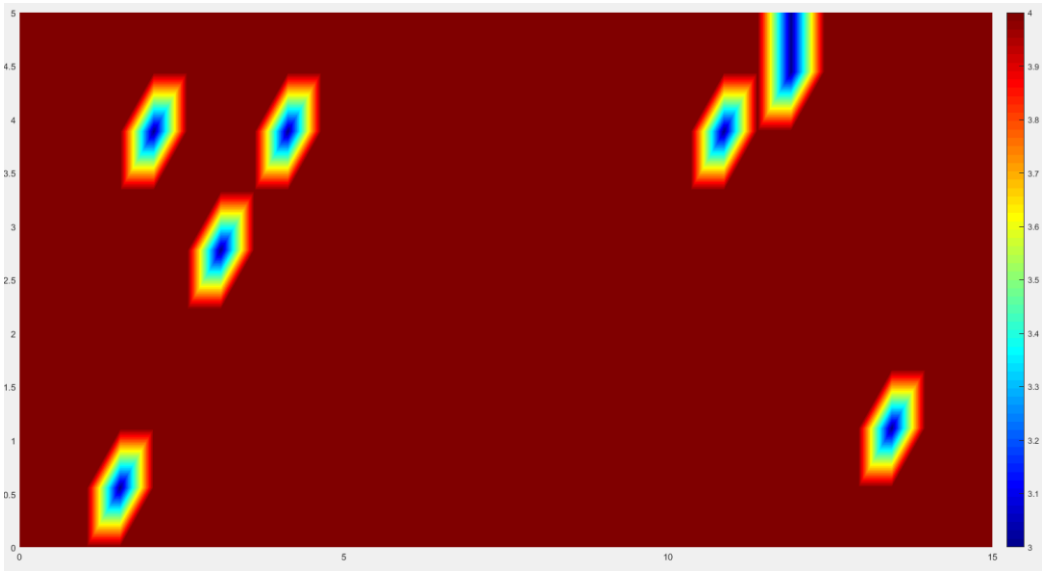
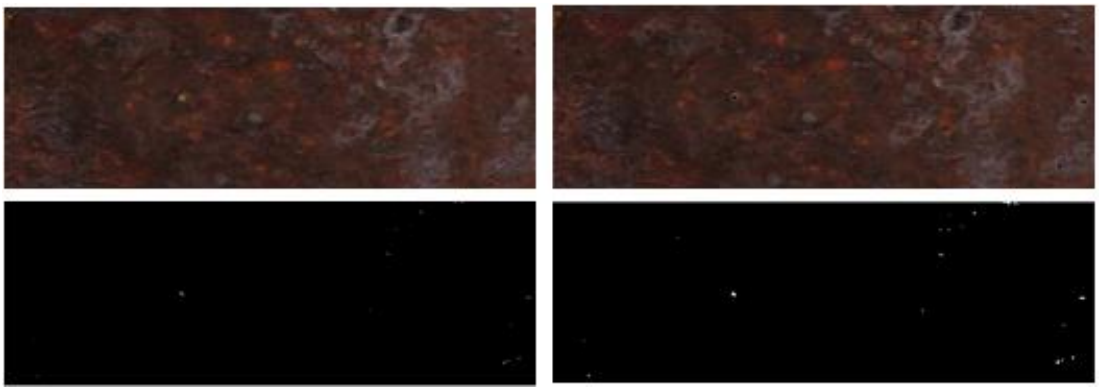


IMAGEN 3.12



C12=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

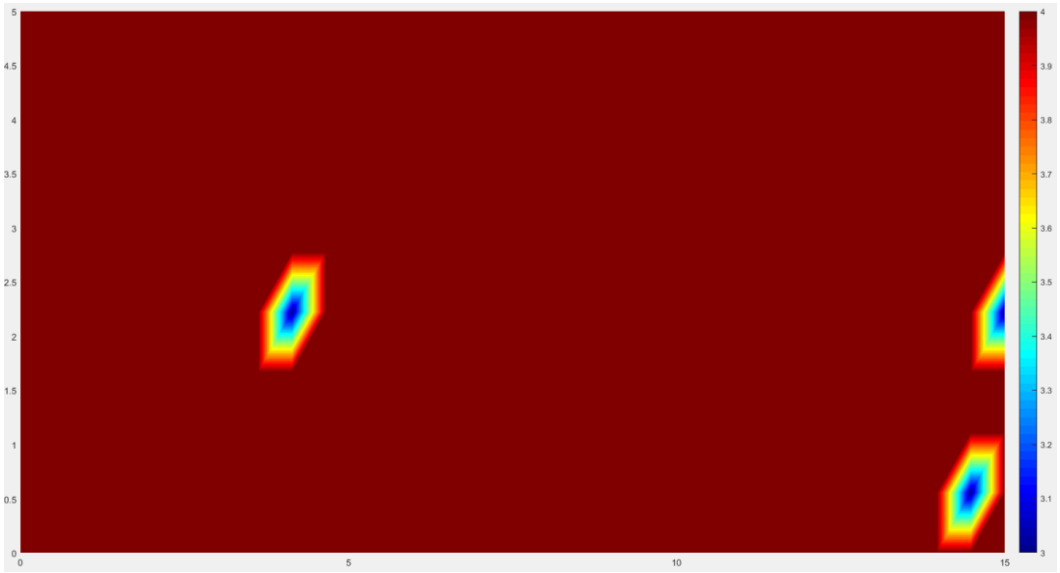
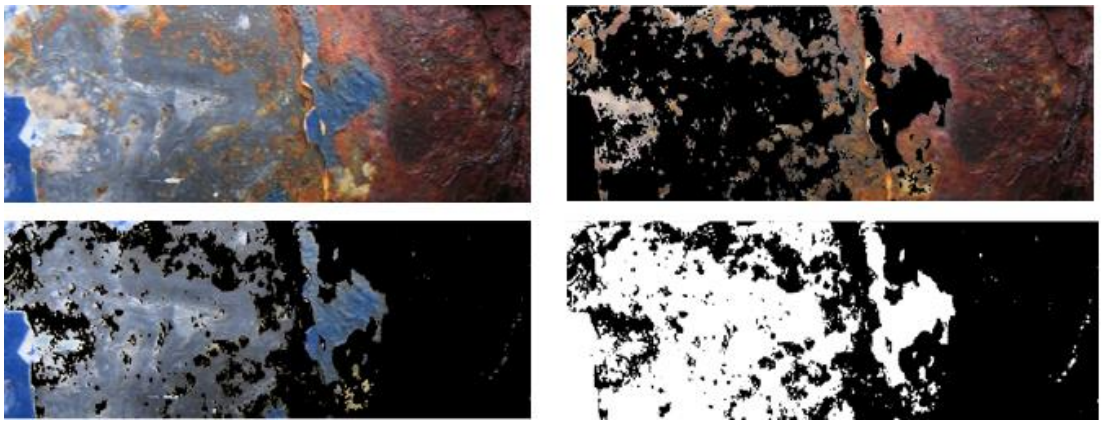


IMAGEN 3.13



C13=

2	2	2	2	3	3	1	1	3	4	1	3	1	1	1	1	4	2	3	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	2	3	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1	3	3	1	2	3	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	4	1	4	4	4	4	4	4	4
1	3	3	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4
1	1	3	3	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4
1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	4	1	1	4	4	4	4	4	4
1	3	3	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	3	1	4	1	2	3	1	4	4	1	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	2	3	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	1	3	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

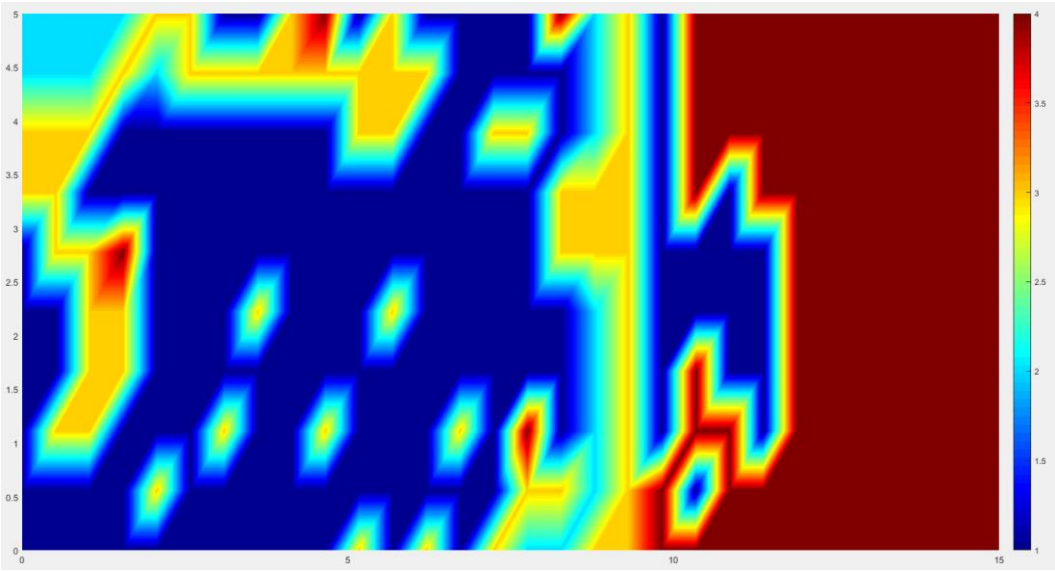
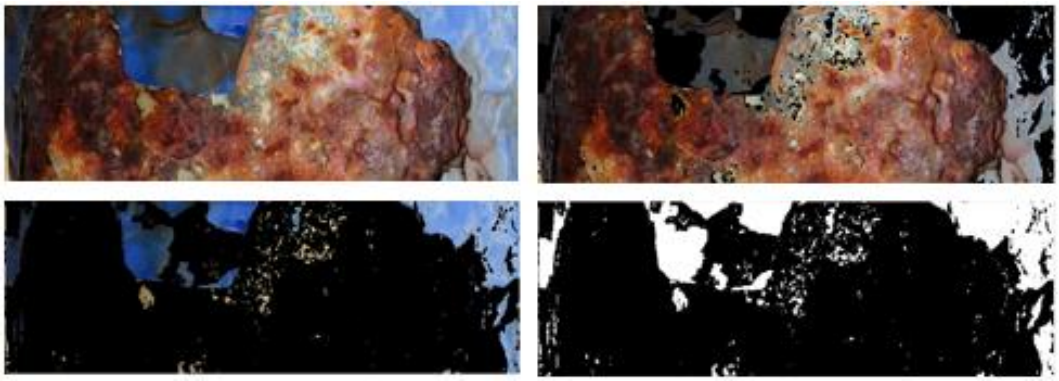


IMAGEN 3.14



C14=

4	3	4	4	4	4	3	1	1	2	3	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
4	3	4	4	4	4	3	1	2	2	3	3	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
2	3	4	4	4	4	4	1	2	2	2	3	1	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	2	2	4	2	2	2
2	4	4	4	4	4	4	1	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2
2	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2
3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2

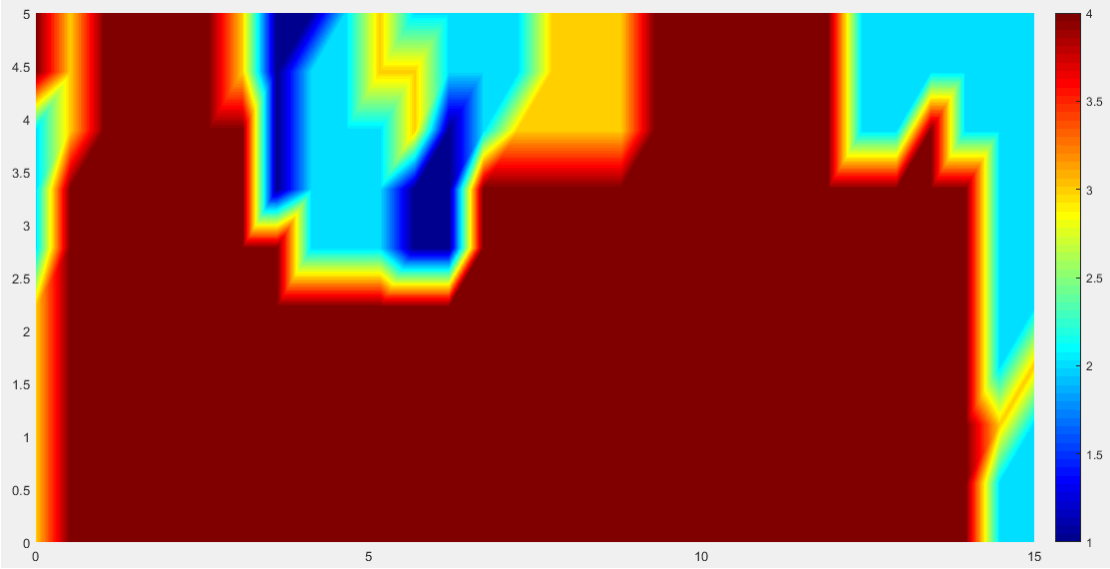
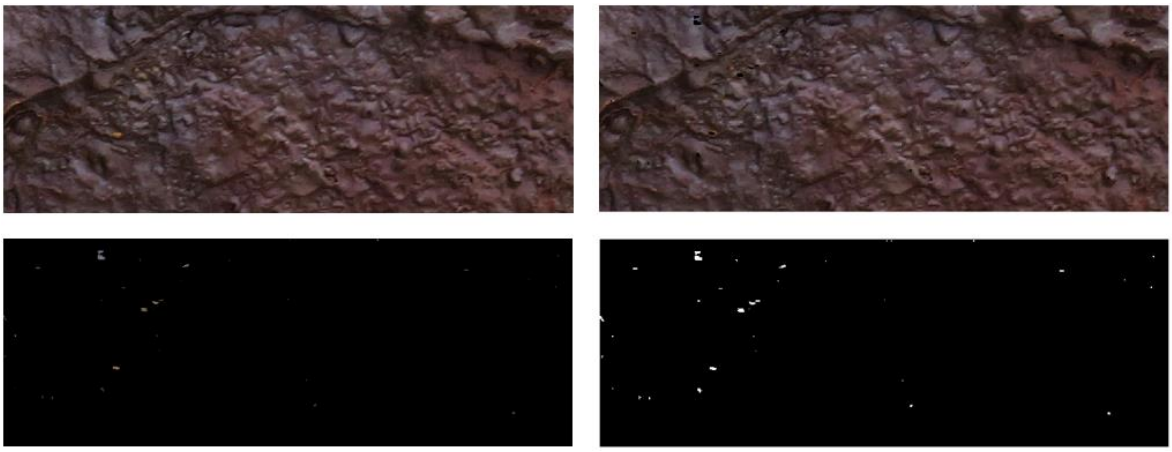


IMAGEN 3.15



C15=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

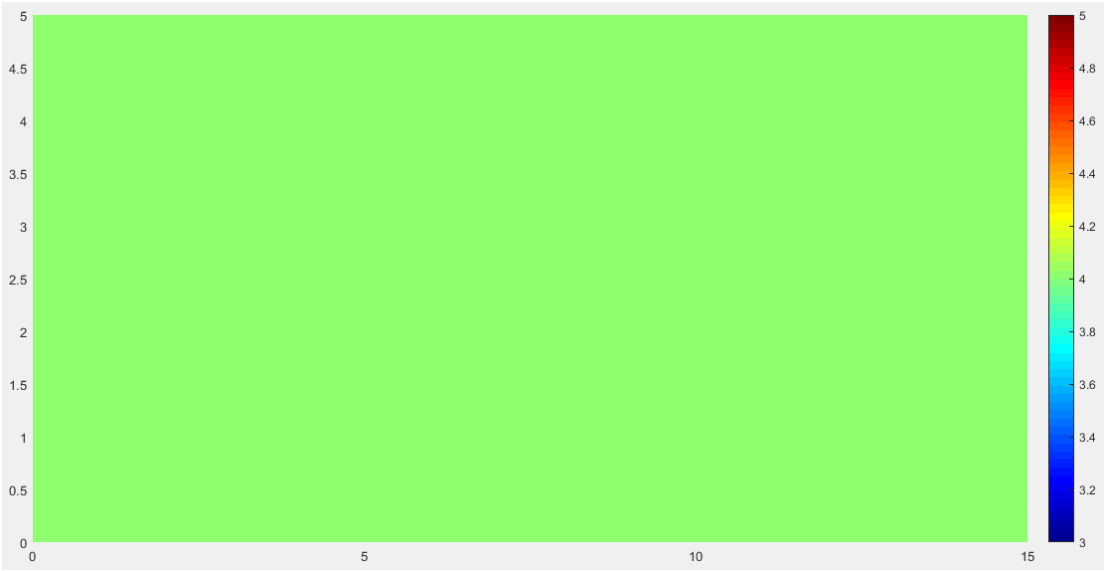
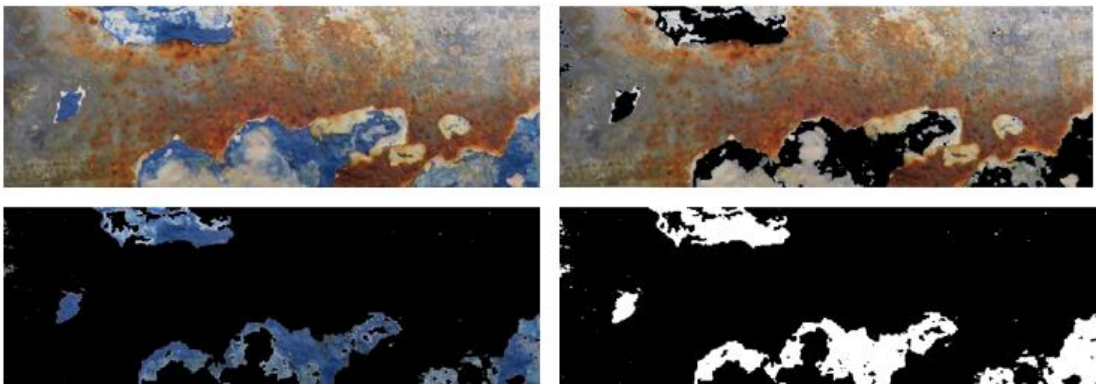


IMAGEN 3.16



C16=

3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
3	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	1	3	1	1
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	1	1	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1
3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	1	1	3	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	1	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	1	1	1

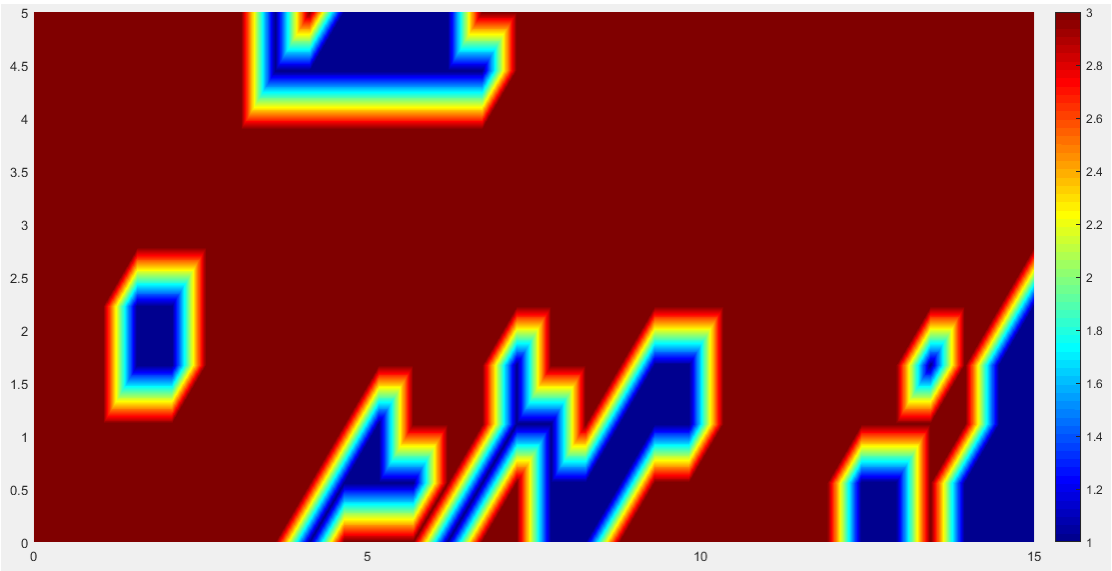
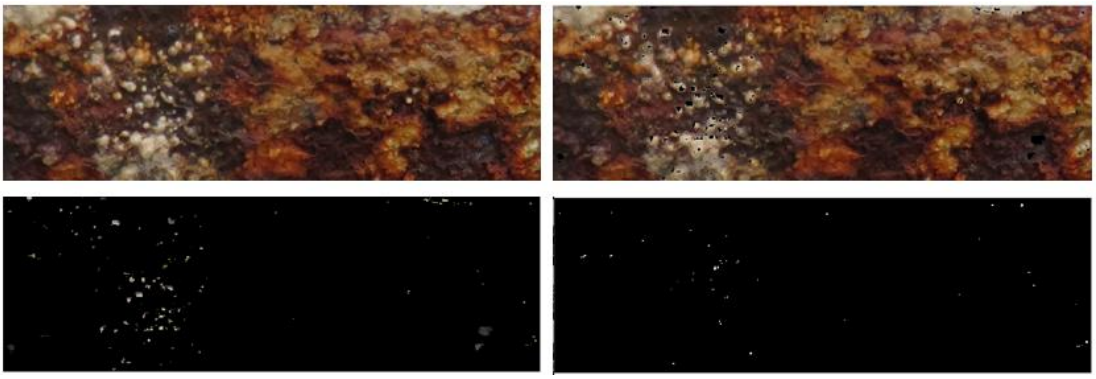


IMAGEN 3.17



C17=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

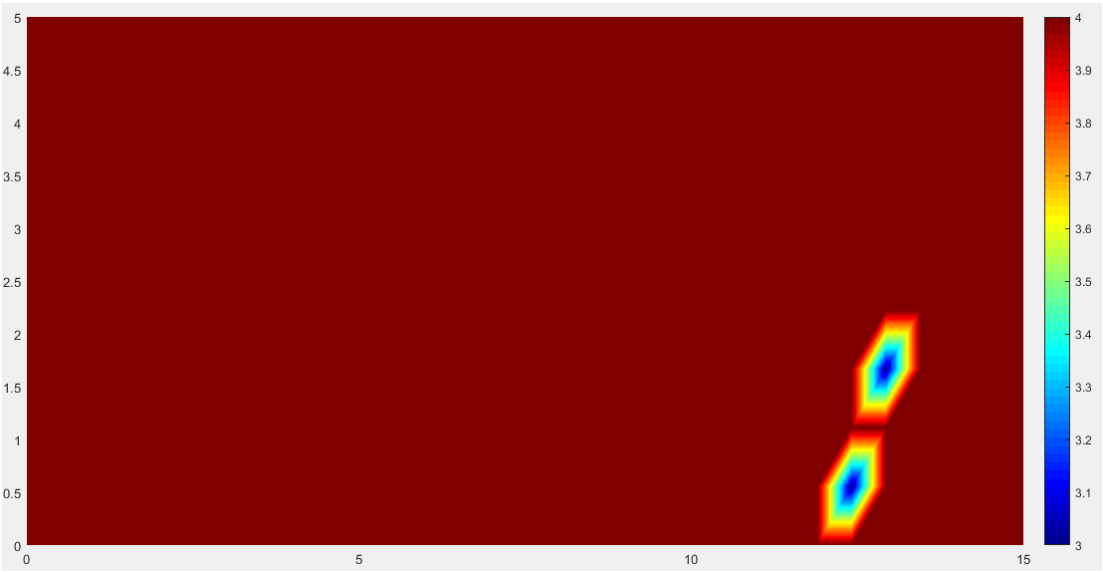
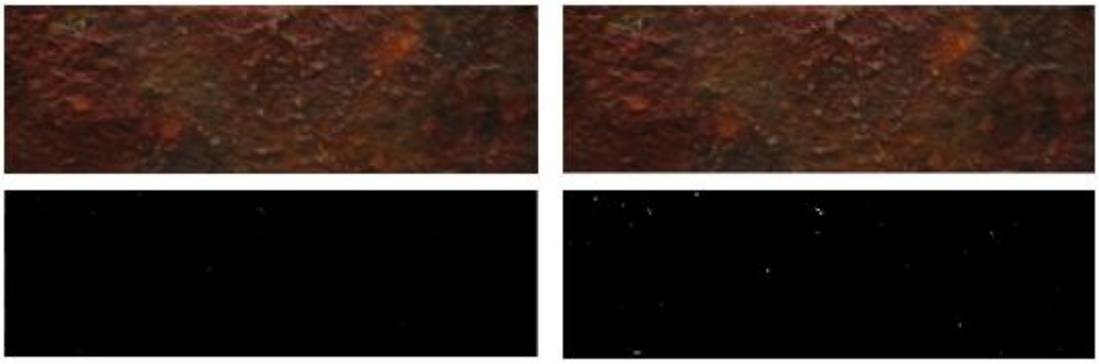


IMAGEN 3.18



C18=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

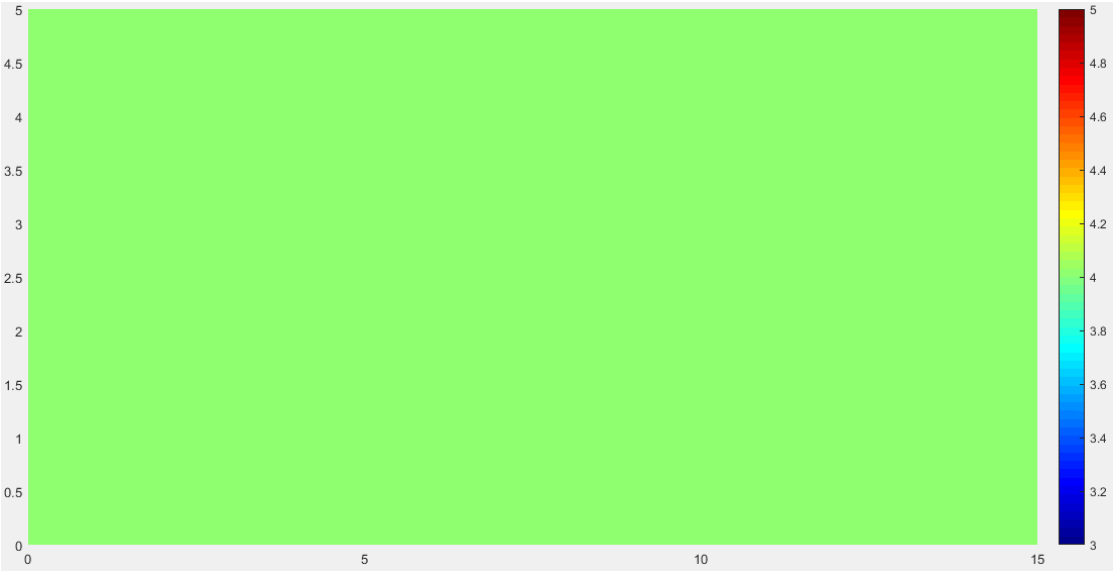
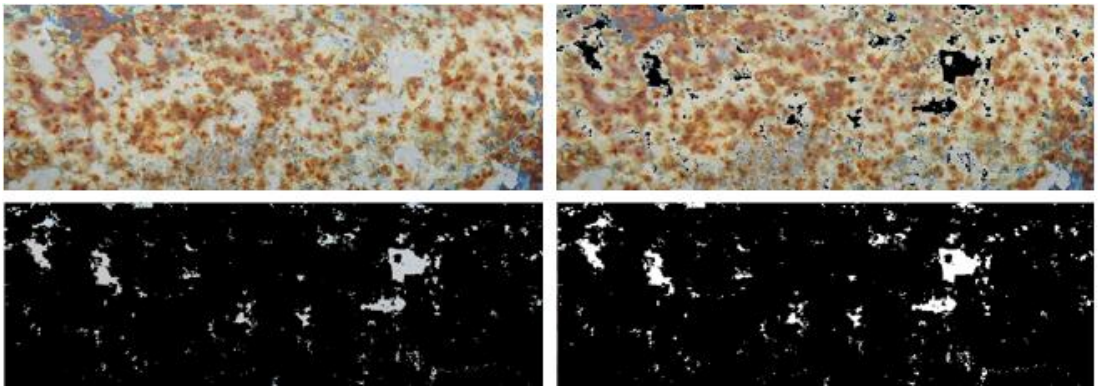


IMAGEN 3.19



C19=

1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1
2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2
2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	
2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	

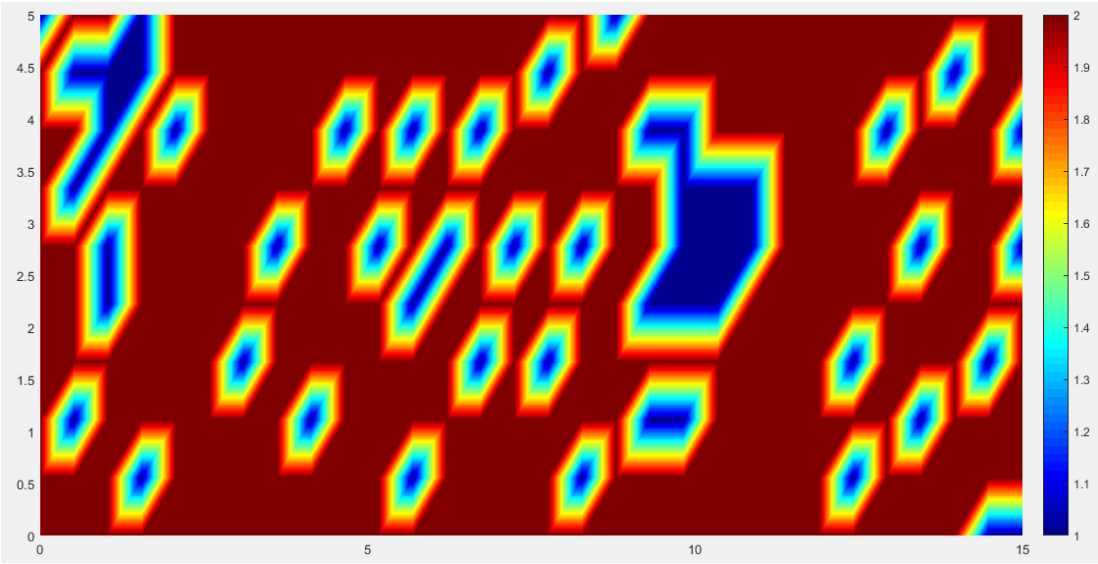
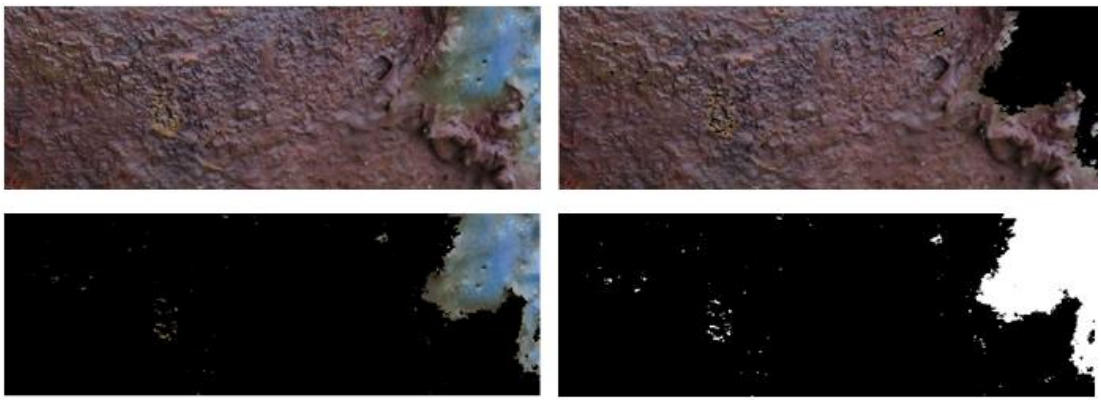


IMAGEN 3.20



C20=

```
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3
```

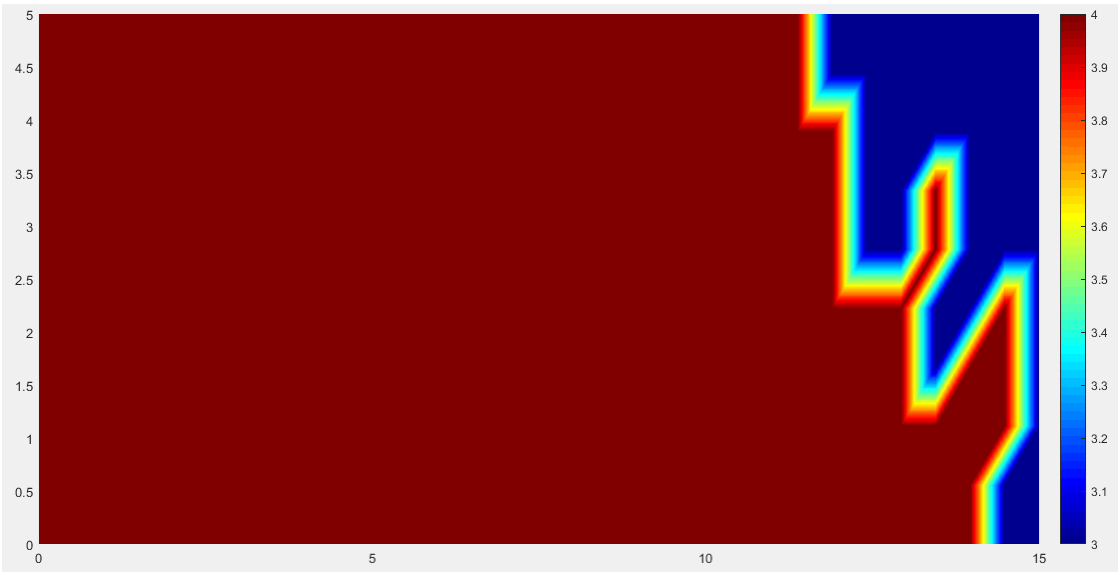
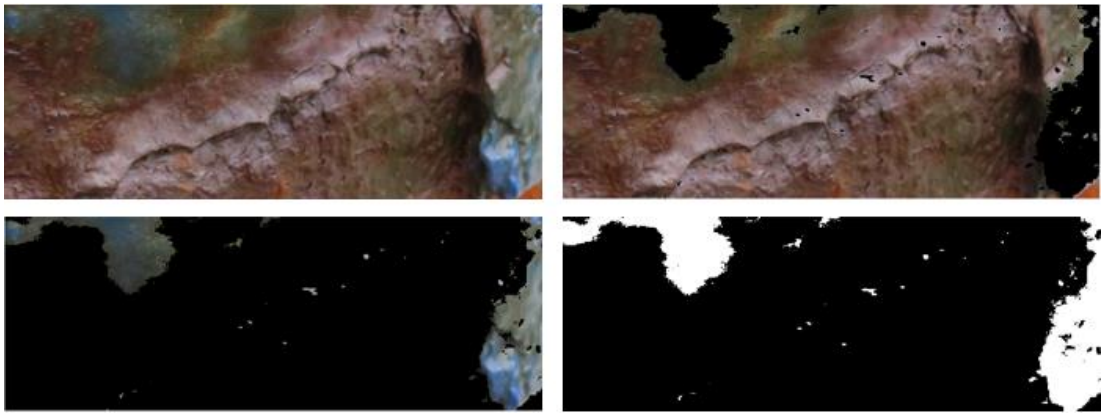


IMAGEN 3.21



C21=

4	4	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
2	2	4	4	4	4	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2

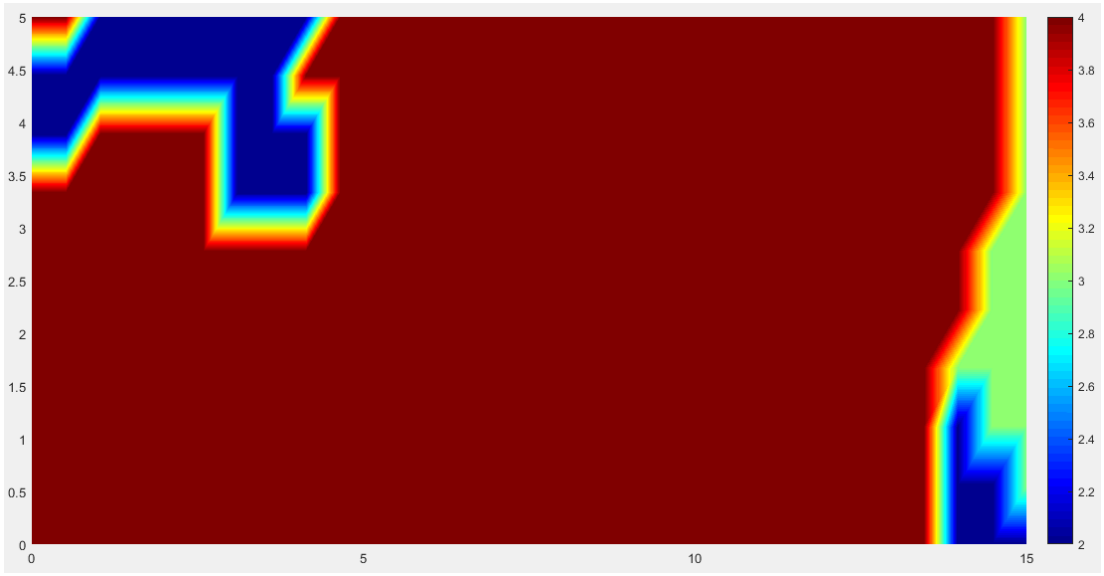
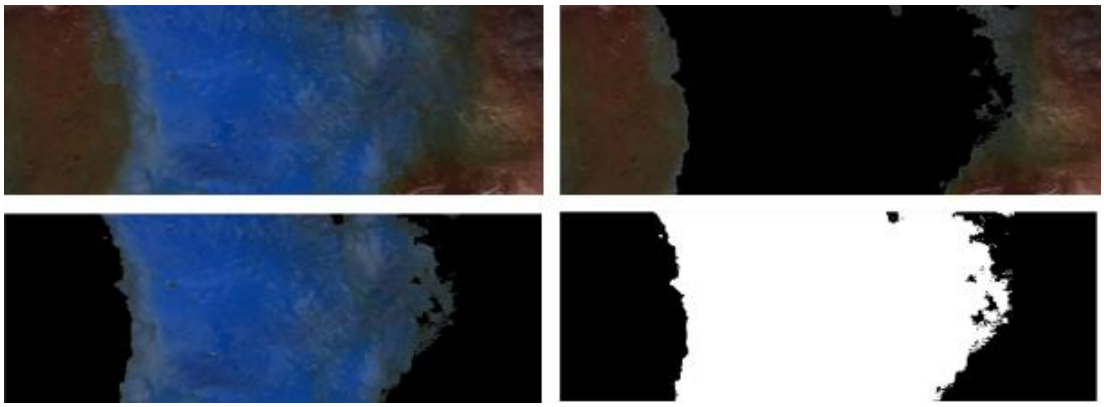


IMAGEN 3.22



C22=

3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	4	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	4	4
3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	4	4
3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	4	4	4
3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	4	4	4

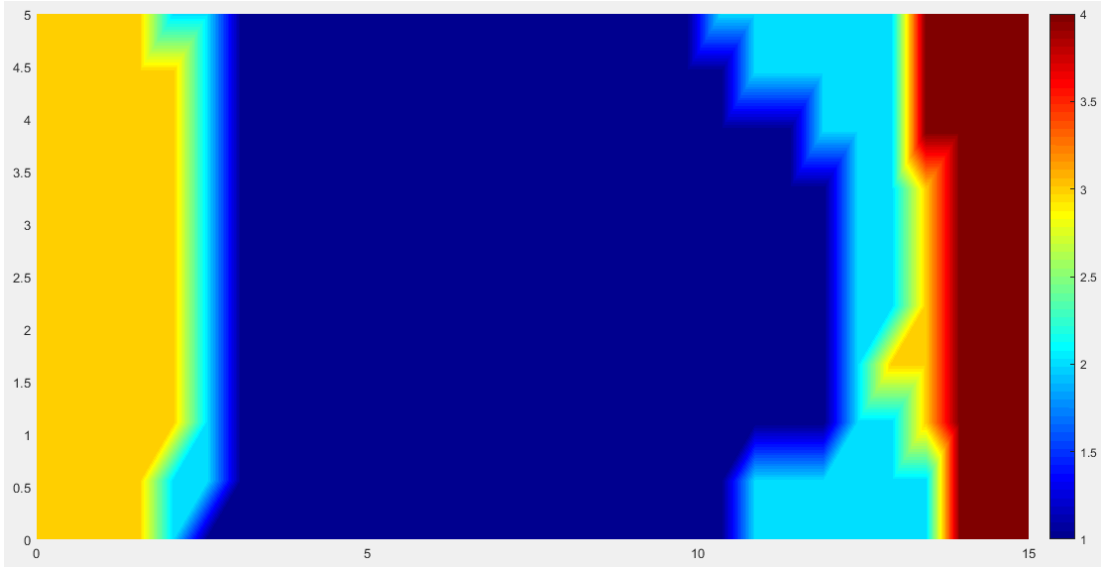
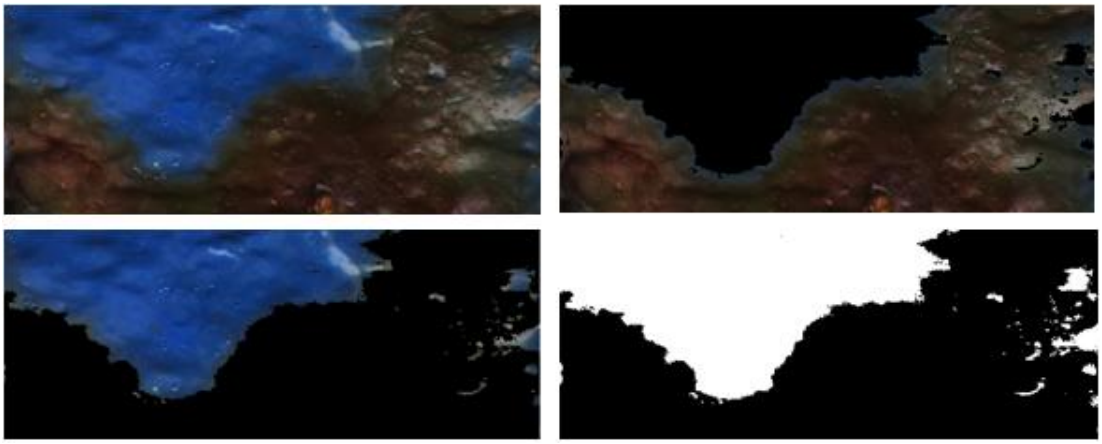


IMAGEN 3.23



C23=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	3	3
4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	4	4	3	3
4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		

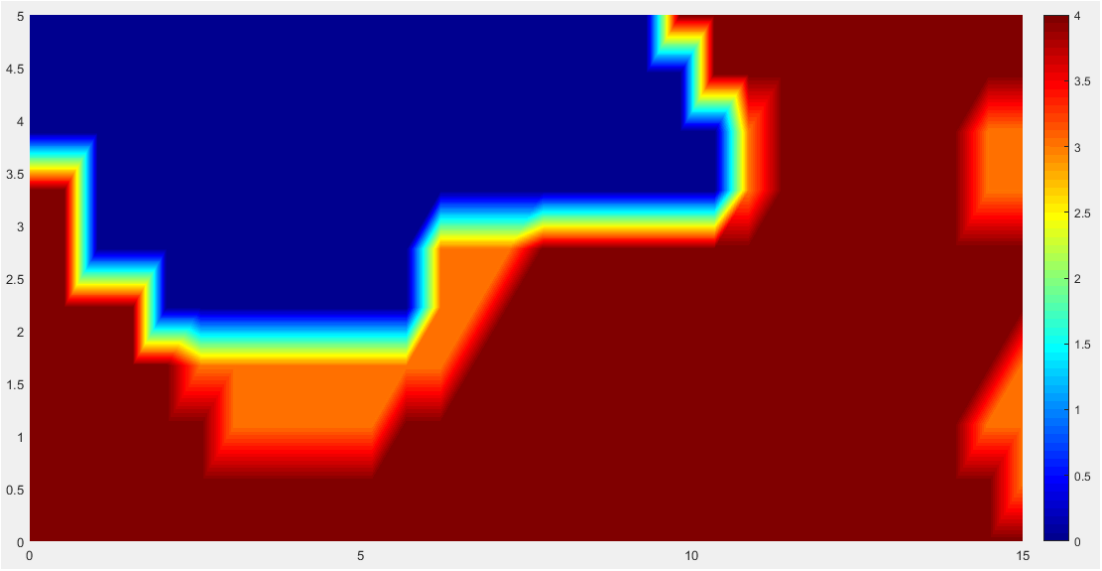
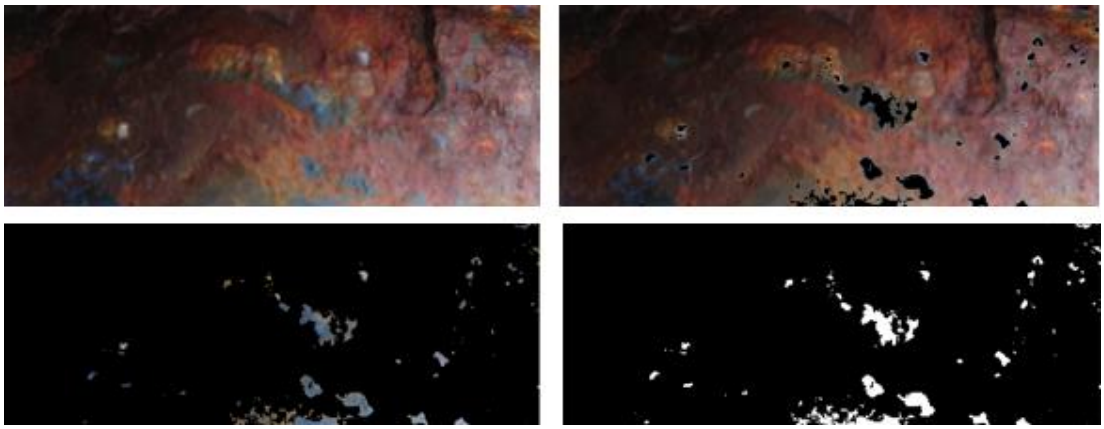


IMAGEN 3.24



C24=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4

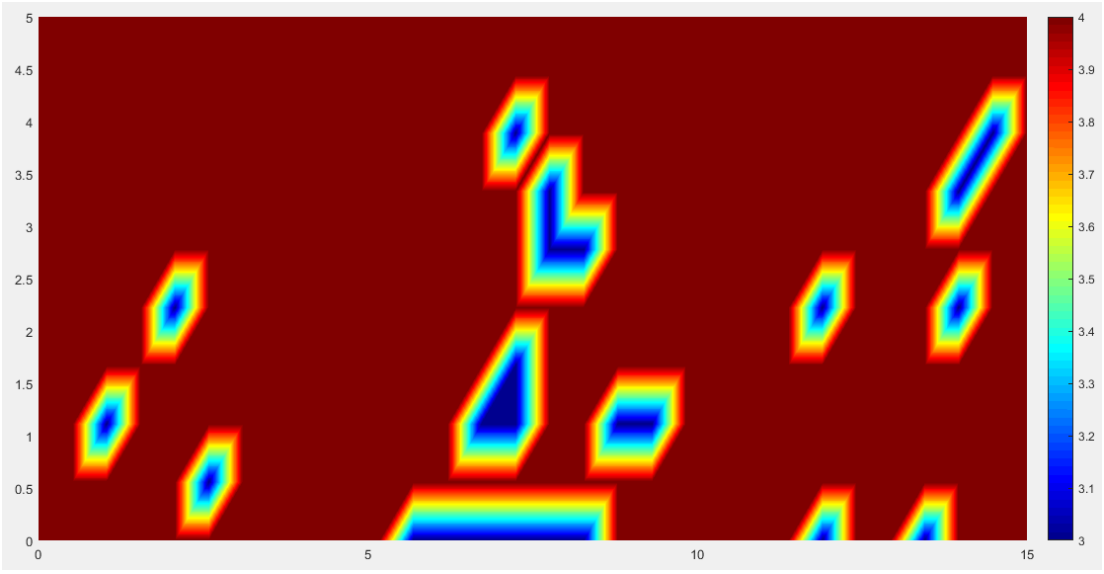
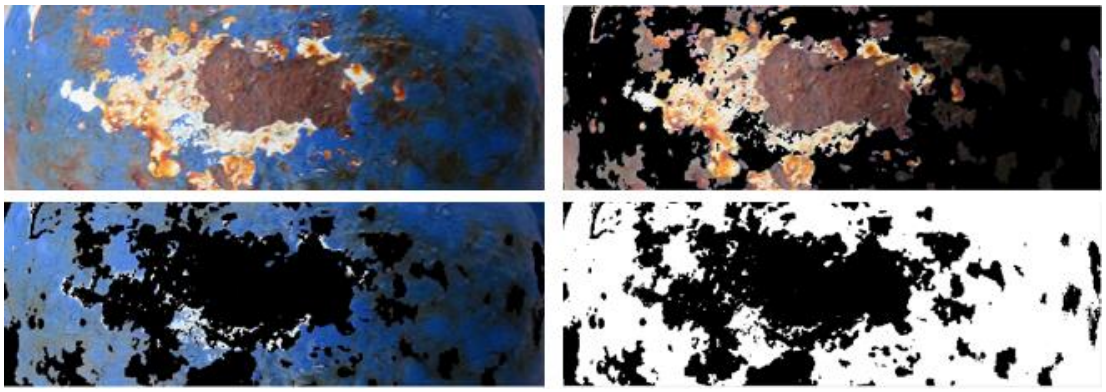


IMAGEN 3.25



C25=

1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1
1	1	1	1	2	1	1	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	1	1	1	1	1	2
1	1	1	1	1	2	1	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	1	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	2	1	1	2
2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	3	4	4	4	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	1	1	2	2	1	2	1	1	1
2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1
2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1

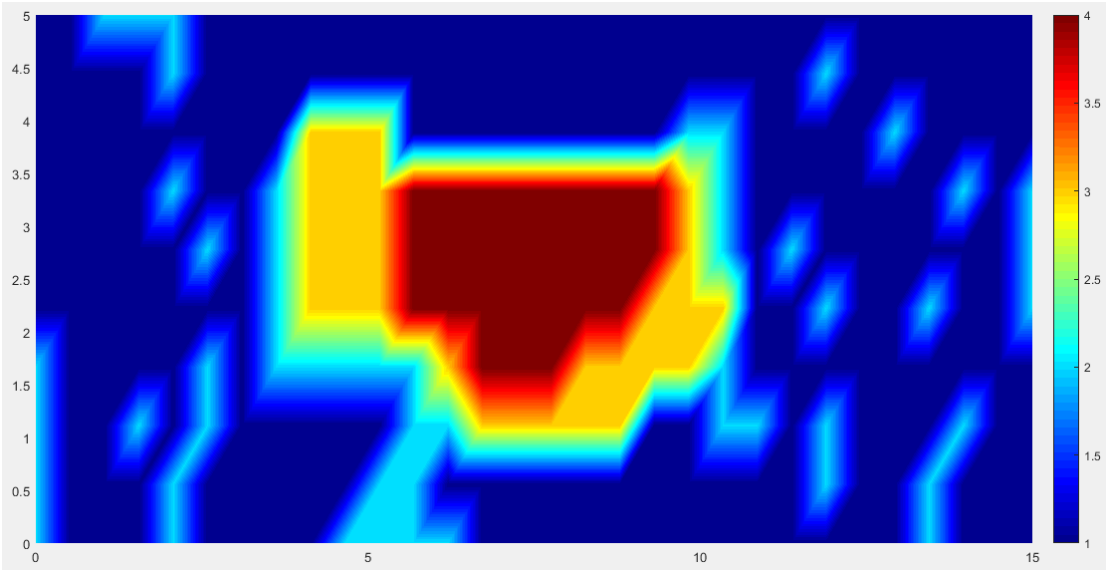
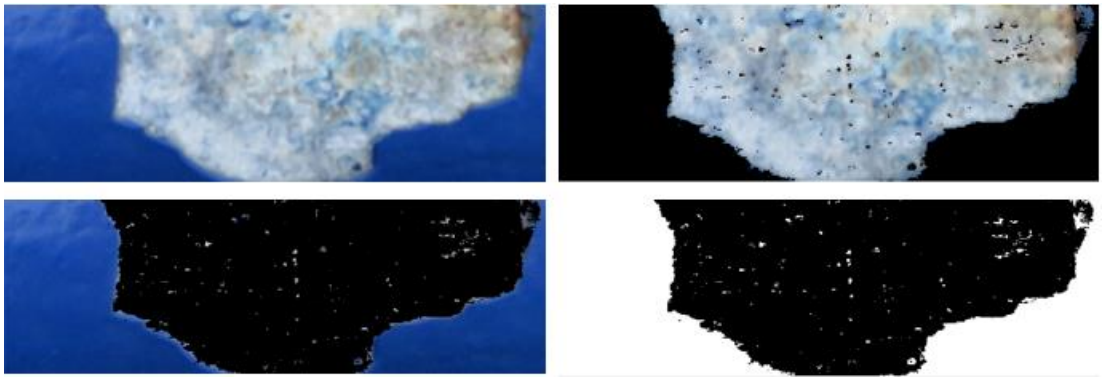


IMAGEN 3.26



C26=

0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	0
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	0
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	0
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	0
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

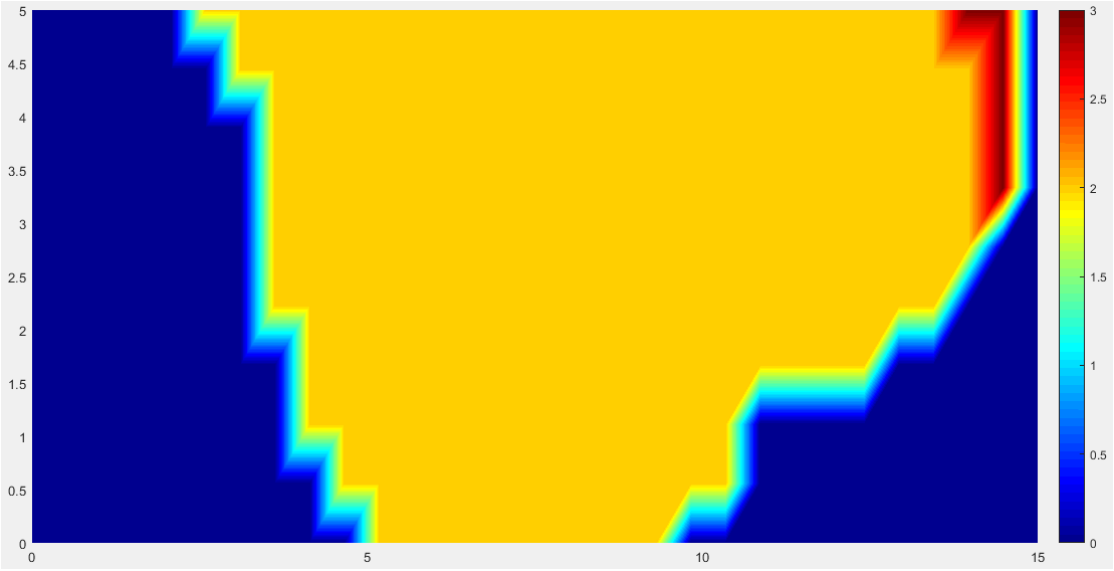
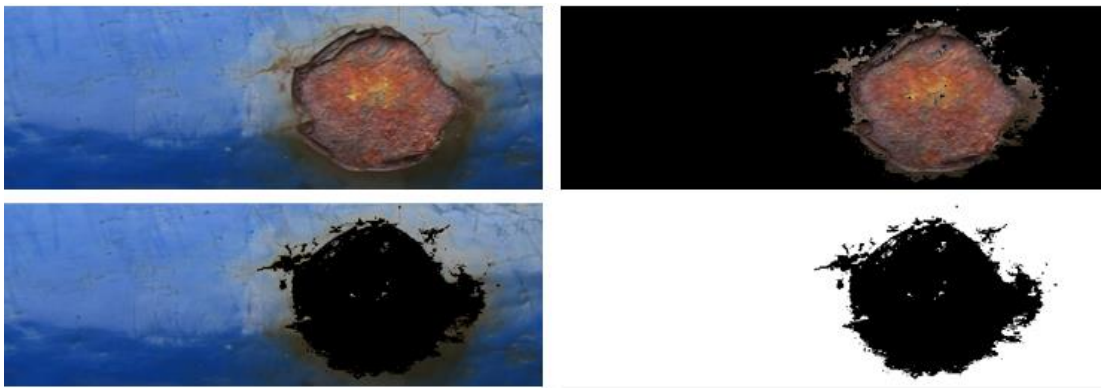


IMAGEN 3.27



C27=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

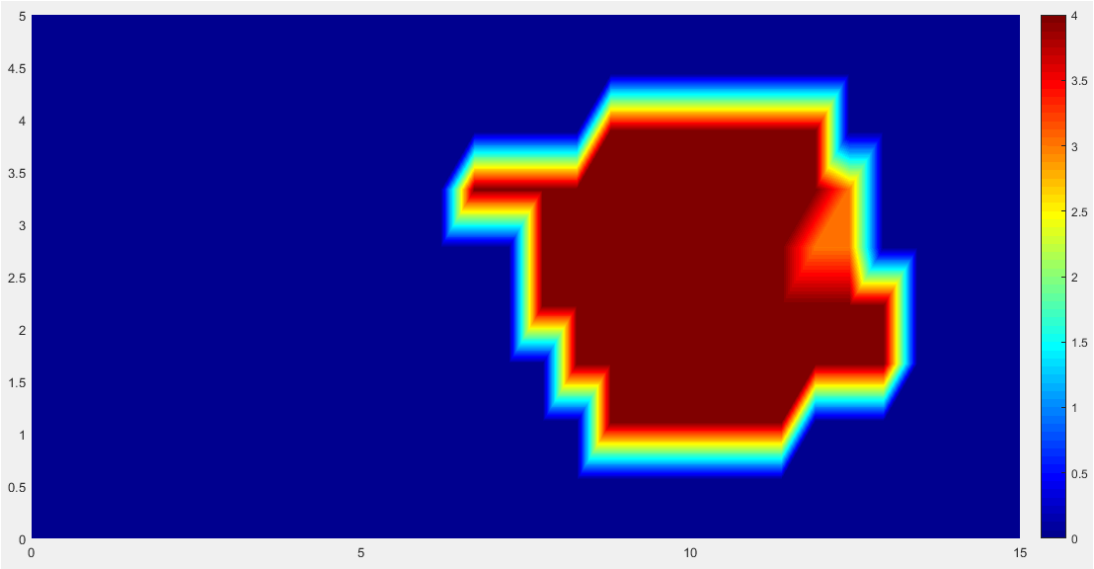


IMAGEN 3.28

C28=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

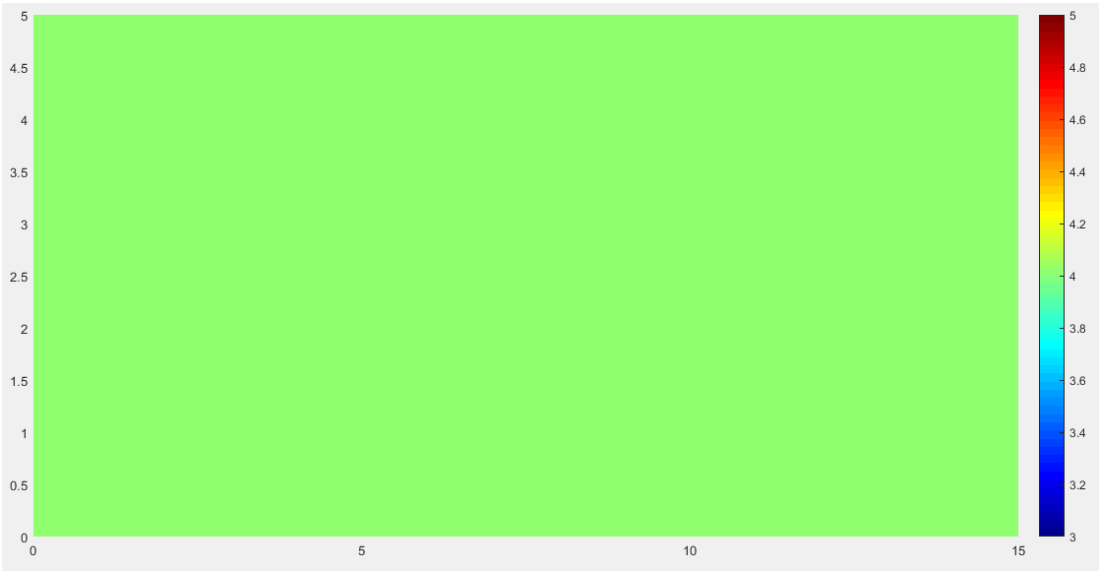


IMAGEN 3.29

C29=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

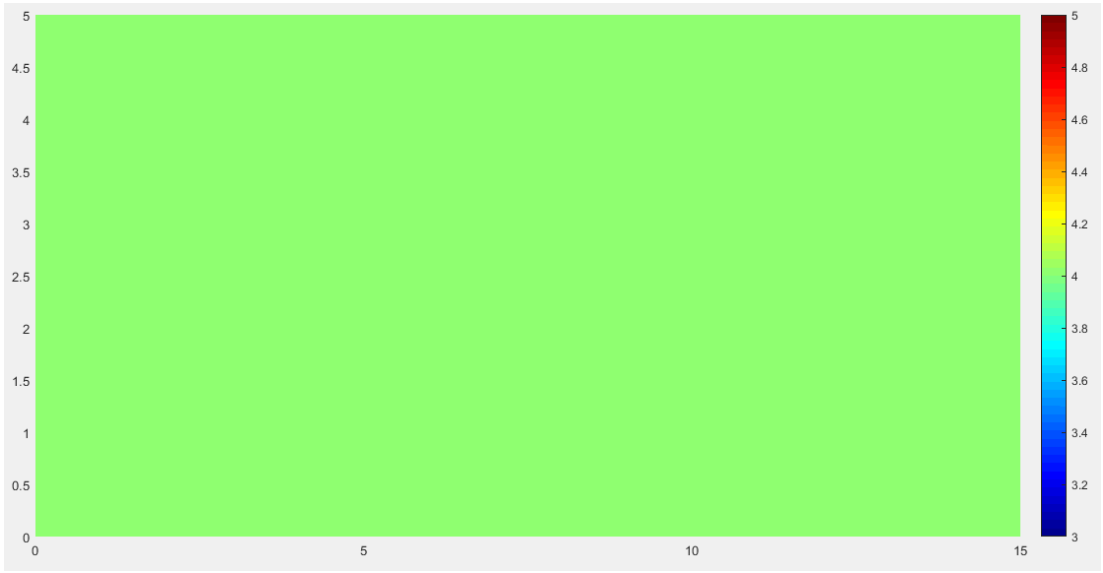
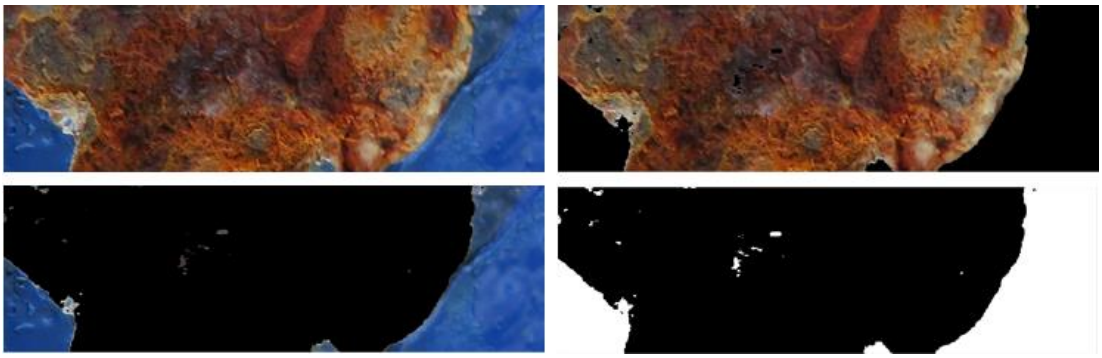
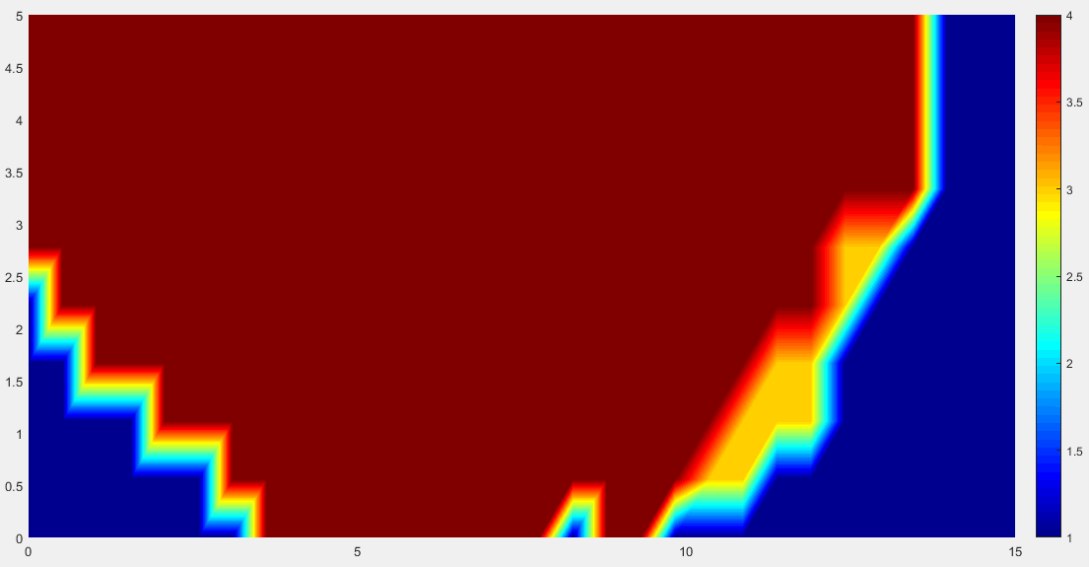


IMAGEN 3.30



C30=

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	1	1	1	1
1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	1	1	1	1	1
1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	1	1	1	1	1
1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1