

El Cubo de Rubik como Grupo de Permutaciones

Asignatura: Álgebra Abstracta (MT1025)

Autores: Ferran Martinavarro, Alejandro Navarro

Fecha: 16/01/2026

Índice

1. Introducción: El cubo de Rubik	2.
1.1. Notación	3.
2. Preliminares teoría de grupos	4.
3. El grupo del cubo de Rubik	6.
3.1. Intuición	6.
3.2. Formalización Completa	6.
4. Subgrupos y Acciones	8.
4.1. Subgrupos Cíclicos Principales	8.
4.2. Subgrupo que fija la orientación	9.
5. Restricciones estructurales	12.
6. Cálculo del orden del grupo de Rubik	13.
7. Conclusiones	13.
8. Bibliografía	14.

1. Introducción: El cubo de Rubik

El cubo de Rubik clásico es un cubo de dimensiones $3 \times 3 \times 3$ con cara cada de un color formado por 26 piezas:

- Centros (6): son aquellas piezas de un solo color. Determinan el color de la cara en la que se encuentran.
- Aristas (12): piezas con dos colores. Se pueden encontrar con dos orientaciones distintas.
- Esquinas (8): piezas con tres colores. En este caso, cada una puede tener 3 orientaciones distintas.

A cada color de una pieza lo llamaremos pegatina, por lo que hay en total $8 \text{ esquinas} \cdot 3 \text{ colores} + 12 \text{ aristas} \cdot 2 \text{ colores} = 48$ pegatinas que pueden cambiar de posición, por lo que determinan una configuración del cubo de Rubik.

Esta estructura permite una serie de movimientos, que se detallan en la SECCIÓN 1.1. Estos movimientos son las rotaciones de una de las caras, lo que permite realizar una serie de permutaciones.

El objetivo de este trabajo es el estudio de estas permutaciones como un subgrupo de S_{Ω} donde Ω es el conjunto de estados del cubo. Para ello, se repasará inicialmente los conceptos de teoría de grupos necesarios, dando así una notación clara en la SECCIÓN 2.

A continuación, se definirá formalmente el grupo de permutaciones del cubo de Rubik clásico en la SECCIÓN 3 y se estudiarán algunos de sus subgrupos y acciones en la SECCIÓN 4.

Cabe destacar que no cualquier elemento de Ω , no constituye un estado válido del cubo de Rubik, como por ejemplo, la rotación de una sola esquina. A estos estados se les denomina estados imposibles o ilegales y se detallarán en la SECCIÓN 5.

Aplicando los resultados obtenidos, podremos calcular el cardinal de todas las posibles combinaciones del cubo de Rubik en la SECCIÓN 6.

1.1. Notación

A lo largo de esta sección, se explicarán los distintos movimientos que se puede hacer con el cubo de Rubik y la notación que se empleará para referirse a ellos.

En los diagramas que se emplean en esta sección se considerará que la posición inicial del cubo es con la cara amarilla arriba y la verde delante (hacia la izquierda). Estos diagramas se han generado utilizando la página web [Rubik's Cube SVG Generator](#) [1].

Movimientos Principales

Cada uno de estos movimientos consiste en una rotación de 90° en sentido horario de una de las caras del cubo. El sentido horario, se determina desde la perspectiva en la que dicha cara es la frontal. Cada uno de estos movimientos se representa con una letra mayúscula.

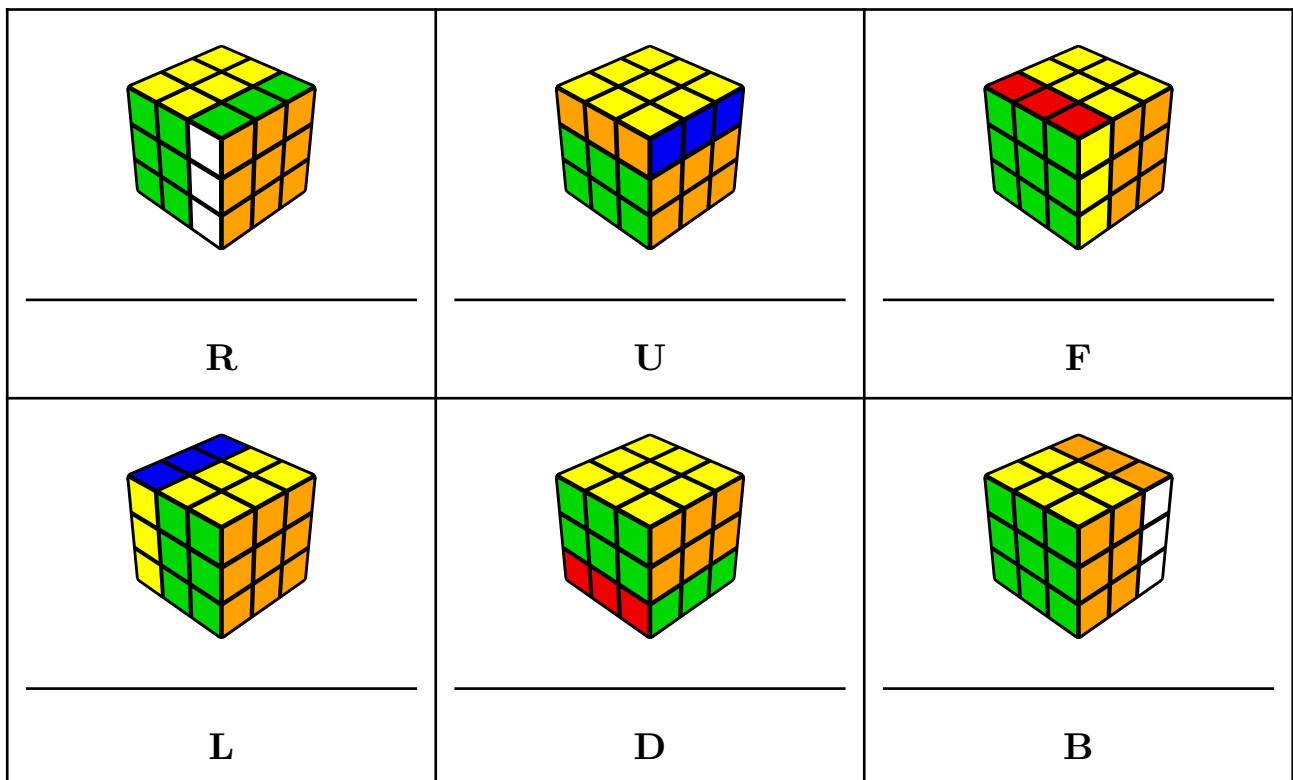


FIGURA 1: Movimientos Principales

Mediante la composición de estos movimientos se puede reproducir todas las permutaciones posibles del cubo de Rubik.

Para cada uno de los movimientos, podemos considerar sus potencias. En particular, dado el movimiento X ,

- $X^2 = X^2$ representa la repetición del movimiento dos veces.
- $X^3 = X^{-1} = X'$ es la repetición del movimiento X tres veces, o equivalentemente, un giro de 90° en sentido antihorario.

Por ejemplo, si repetimos R dos veces obtenemos un movimiento al que llamamos R2, y si lo hacemos 3 veces (o hacer R pero en sentido contrario), entonces se llama R'.

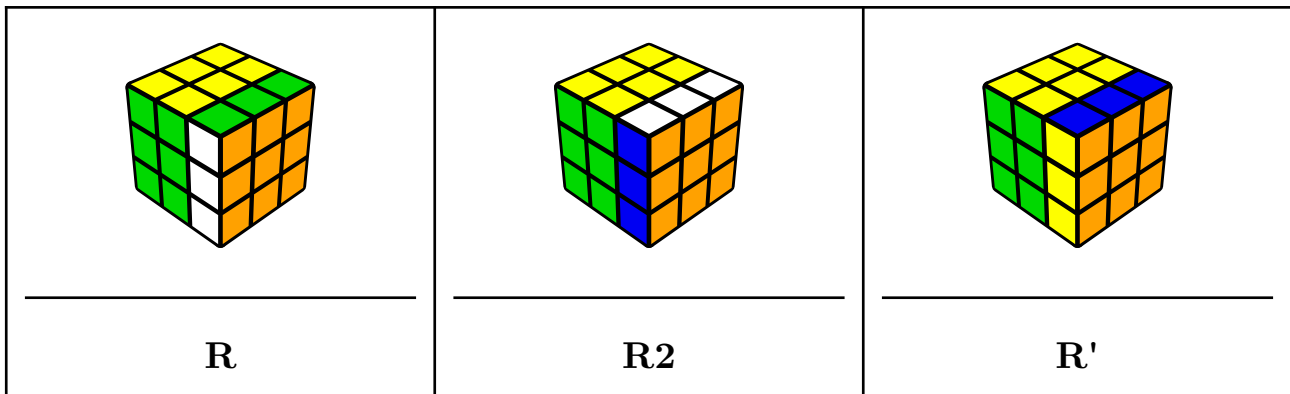


FIGURA 2: Ejemplo R2 y R'

A la hora de contar el número de movimientos empleados para una resolución del cubo, todos estos cuentan como solo uno.

Nota: Se usará indistintamente la notación X' y X^3 por su simplicidad para los subgrupos cíclicos.

Aunque hay nombre para más movimientos, estos son solo una composición de los básicos y por tanto, se prescindirá de ellos.

2. Preliminares teoría de grupos

En esta sección se explica brevemente la teoría de grupos que se empleará a lo largo de las siguientes secciones. Para ello, se ha consultado G. Navarro Ortega [2].

Definición 2.0.1. (Grupo)

Sea G un conjunto no vacío y $\cdot : G \times G \rightarrow G$ una operación binaria interna cuya imagen de (x, y) denotamos por $x \cdot y$. Decimos que (G, \cdot) es un grupo si se cumple:

1. $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z) \quad \forall x, y, z \in G$ (asociatividad)
2. $\exists 1 \in G \quad / \quad 1 \cdot x = x \cdot 1 = x \quad \forall x \in G$ (elemento neutro)
3. $\forall x \in G, \quad \exists y \in G \quad / \quad x \cdot y = y \cdot x = 1$ (elemento inverso)

Definición 2.0.2. (Subgrupo)

Sea G un grupo y $H \subset G$ un conjunto no vacío. Decimos que H es un subgrupo de G , denotado como $(H \leq G)$, si $\forall x, y \in H$:

- $x^{-1} \in H$
- $x \cdot y \in H$

Definición 2.0.3. (Grupo Cíclico)

Dado un grupo G , decimos que es cíclico si $\exists x \in G$ tal que $G = \{x^n : n \in \mathbb{Z}\} = \langle x \rangle$. Se dice que G está generado por x .

Para cualquier grupo G , podemos obtener subgrupos abelianos $\langle g \rangle$ con $g \in G$.

En caso de que se trate de un grupo (o subgrupo) generado por más elementos, usamos la notación:

$$\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle = \left\{ x_{i_1}^{n_1} \cdot x_{i_2}^{n_2} \cdots x_{i_m}^{n_m} \mid m \in \mathbb{N}, i_j \in \{1, \dots, k\}, n_j \in \mathbb{Z} \right\}$$

Este es el grupo más pequeño que contiene los elementos x_1, \dots, x_k .

Definición 2.0.4. (Permutación)

Sea Ω un conjunto, llamamos permutación a una aplicación biyectiva $f : \Omega \rightarrow \Omega$. Al conjunto de permutaciones de Ω lo denotamos por S_Ω y forma un grupo con la operación $f \cdot g = g \circ f$.

Definición 2.0.5. (Acción)

Sea Ω un conjunto no vacío y G un grupo. Llamamos acción a una operación

$$\begin{aligned} \cdot : \Omega \times G &\rightarrow \Omega \\ (\alpha, g) &\mapsto \alpha \cdot g \end{aligned}$$

De manera que dado $\alpha \in \Omega$, $\forall g \in G$, $\exists! \alpha \cdot g \in \Omega$ y además cumple las siguientes propiedades:

- $(\alpha \cdot g) \cdot h = \alpha \cdot (gh) \quad \forall \alpha \in \Omega, \quad \forall g, h \in G$
- $\alpha \cdot 1 = \alpha \quad \forall \alpha \in \Omega$

Esto define una relación de equivalencia: dados $\alpha, \beta \in \Omega$, $\alpha \sim \beta \iff \exists g \in G$ tal que $\alpha \cdot g = \beta$.

Definición 2.0.6. (Órbita y Estabilizador)

Dada una acción $\cdot : \Omega \times G \rightarrow \Omega$ y $\alpha \in \Omega$. Llamamos órbita de α a su clase de equivalencia:

$$\mathcal{O}(\alpha) = \{\alpha \cdot g \mid g \in G\}$$

El estabilizador de α en G se define como

$$\text{Stab}_G(\alpha) = G_\alpha = \{g \in G \mid \alpha \cdot g = \alpha\}$$

Esta elección de numeración permite identificar fácilmente si una pegatina pertenece a una esquina o una arista, ya que las primeras siempre son número impares y las segundas pares.

Con esta notación, podemos ahora definir el grupo de Rubik como un subgrupo \mathcal{R} de S_{48} generado por los movimientos básicos.

Para ello definimos cada movimiento como producto de ciclos disjuntos de manera que si M es un movimiento, $M(i)$ representa la posición en la que termina la pegatina que estaba en la posición i . En la FIGURA 4 se puede observar el resultado de aplicar U en el cubo resuelto.

Definición 3.2.1. (Movimientos Básicos como ciclos disjuntos)

- $U = (1, 3, 5, 7)(2, 4, 6, 8)(9, 33, 25, 17)(34, 26, 18, 10)(35, 27, 19, 11)$
- $D = (41, 43, 45, 47)(42, 44, 46, 48)(15, 23, 31, 39)(14, 22, 30, 38)(13, 21, 29, 37)$
- $R = (25, 27, 29, 31)(26, 28, 30, 32)(3, 39, 43, 19)(4, 40, 44, 20)(5, 33, 45, 21)$
- $L = (9, 11, 13, 15)(10, 12, 14, 16)(1, 17, 41, 35)(8, 24, 48, 36)(7, 23, 47, 37)$
- $F = (17, 19, 21, 23)(18, 20, 22, 24)(7, 25, 43, 13)(6, 32, 42, 12)(5, 31, 41, 11)$
- $B = (33, 35, 37, 39)(34, 36, 38, 40)(1, 15, 45, 27)(2, 16, 46, 28)(3, 9, 47, 29)$

			7	8	1							
			6	U	2							
			5	4	3							
17	18	19	25	26	27	33	34	35	9	10	11	
16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36	
15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37	
			41	42	43							
			48	D	44							
			47	46	45							

FIGURA 4: Aplicación de U sobre el cubo resuelto

Definición 3.2.2. (Grupo de Rubik) De acuerdo con las convenciones y definiciones anteriores, se define el grupo de permutaciones del cubo de Rubik como

$$\mathcal{R} = \langle U, D, R, L, F, B \rangle \leq S_{48}$$

4. Subgrupos y Acciones

Sea $\Omega = \{1, \dots, 48\}$ el conjunto de posiciones del cubo siguiendo el esquema de la FIGURA 3, consideraremos las acciones de subgrupos de \mathcal{R} sobre Ω por aplicación.

También consideraremos el conjunto $\Omega_C = \{(v_i)_{i=1}^{48} \in \Omega^{48} : v_i \neq v_j \forall i \neq j \in \Omega\}$ que representa una configuración de las pegatinas del cubo de manera que \mathcal{R} actúa por aplicación a cada componente del vector: Sean $\vec{v} = (v_i)_{i=1}^{48} \in \Omega_C$ y $h \in \mathcal{R}$

$$\vec{v} \cdot h = (h(v_i))_{i=1}^{48}$$

Esta acción es interesante desde un punto de vista didáctico, ya que permite ver la acción sobre el cubo completo, como normalmente estamos acostumbrados.

4.1. Subgrupos Cíclicos Principales

Se trata de los subgrupos $\langle U \rangle, \langle D \rangle, \langle R \rangle, \langle L \rangle, \langle F \rangle, \langle B \rangle$ de orden 4. Por ejemplo,

$$\langle U \rangle = \{1, U, U^2, U^3\}$$

Por la acción sobre Ω , este subgrupo tiene 5 órbitas de cardinal 4, los cinco 4-ciclos con los que se define U :

$$\begin{aligned} \mathcal{O}(1) &= \{1, 3, 5, 7\} & \mathcal{O}(2) &= \{2, 4, 6, 8\} \\ \mathcal{O}(9) &= \{9, 33, 25, 17\} & \mathcal{O}(34) &= \{34, 26, 18, 10\} \\ \mathcal{O}(35) &= \{35, 27, 19, 11\} \end{aligned}$$

El resto de órbitas son de cardinal 1 puesto que las pegatinas no se mueven al aplicar U .

Si tomamos ahora la acción sobre Ω_C para verlo sobre el cubo completo, tenemos que la órbita del cubo resuelto (el vector $(i)_{i=1}^{48}$) es:

<table> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>8</td><td>U</td><td>4</td></tr> <tr><td>7</td><td>6</td><td>5</td></tr> <tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td></tr> <tr><td>16</td><td>L</td><td>12</td><td>24</td><td>F</td><td>20</td><td>32</td><td>R</td><td>28</td><td>40</td><td>B</td><td>36</td></tr> <tr><td>15</td><td>14</td><td>13</td><td>23</td><td>22</td><td>21</td><td>31</td><td>30</td><td>29</td><td>39</td><td>38</td><td>37</td></tr> <tr><td colspan="3"></td><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td colspan="6"></td></tr> <tr><td colspan="3"></td><td>48</td><td>D</td><td>44</td><td colspan="6"></td></tr> <tr><td colspan="3"></td><td>47</td><td>46</td><td>45</td><td colspan="6"></td></tr> </table>												1	2	3	8	U	4	7	6	5	9	10	11	17	18	19	25	26	27	33	34	35	16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36	15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37				41	42	43										48	D	44										47	46	45						
1	2	3																																																																																										
8	U	4																																																																																										
7	6	5																																																																																										
9	10	11	17	18	19	25	26	27	33	34	35																																																																																	
16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36																																																																																	
15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37																																																																																	
			41	42	43																																																																																							
			48	D	44																																																																																							
			47	46	45																																																																																							
1																																																																																												

<table> <tr><td>7</td><td>8</td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>U</td><td>2</td></tr> <tr><td>5</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td></tr> <tr><td>16</td><td>L</td><td>12</td><td>24</td><td>F</td><td>20</td><td>32</td><td>R</td><td>28</td><td>40</td><td>B</td><td>36</td></tr> <tr><td>15</td><td>14</td><td>13</td><td>23</td><td>22</td><td>21</td><td>31</td><td>30</td><td>29</td><td>39</td><td>38</td><td>37</td></tr> <tr><td colspan="3"></td><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td colspan="6"></td></tr> <tr><td colspan="3"></td><td>48</td><td>D</td><td>44</td><td colspan="6"></td></tr> <tr><td colspan="3"></td><td>47</td><td>46</td><td>45</td><td colspan="6"></td></tr> </table>												7	8	1	6	U	2	5	4	3	17	18	19	25	26	27	33	34	35	9	10	11	16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36	15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37				41	42	43										48	D	44										47	46	45						
7	8	1																																																																																										
6	U	2																																																																																										
5	4	3																																																																																										
17	18	19	25	26	27	33	34	35	9	10	11																																																																																	
16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36																																																																																	
15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37																																																																																	
			41	42	43																																																																																							
			48	D	44																																																																																							
			47	46	45																																																																																							
U																																																																																												

Figure 1 displays two 15-puzzle states, U2 and U3, represented as 4x5 grids. The grids show the positions of the 15 tiles, with colors indicating their original positions (1-15) and letters indicating their current positions (A-M). The goal state is shown in the top row of each grid.

U2 State:

25	26	27	33	34	35	9	10	11	17	18	19
16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36
15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37
			41	42	43						
			48	D	44						
			47	46	45						

U3 State:

33	34	35	9	10	11	17	18	19	25	26	27
16	L	12	24	F	20	32	R	28	40	B	36
15	14	13	23	22	21	31	30	29	39	38	37
			41	42	43						
			48	D	44						
			47	46	45						

4.2. Subgrupo que fija la orientación

- Tiene una pegatina blanca o amarilla en alguna de estas cara, o
- Si dicha pieza no posee pegatinas blancas o amarillas pero tiene una pegatina verde o azul en alguna de estas dos últimas caras.

Es muy sencillo ver las órbitas de este grupo. Una de las características que tiene es que no se puede deshacer un cubo con caras opuestas del mismo color:

FIGURA 6: Cubo de Rubik invariante bajo G

Aquí, la acción sobre Ω_C «vendría» dada por $\alpha \cdot g = \alpha \quad \forall \alpha \in \Omega_C, g \in G$. Se ha entrecomillado *vendría* puesto que no tenemos bien definido Ω_C para este cubo ya que hay piezas iguales con nombres diferentes. Por ejemplo las dos esquinas que poseen las pegatinas (7, 11, 17) y (3, 27, 33) son iguales con estos colores.

Un subgrupo similar, ligeramente mayor se obtiene al permitir cualquier giro de las caras superiores e inferiores, es decir $H = \langle U, D, R2, L2, F2, B2 \rangle$.

Este subgrupo juega un papel fundamental en el estudio estructural del grupo del cubo de Rubik y, en particular, en la demostración de que toda configuración del cubo se puede resolver en 20 movimientos o menos, resultado conocido como *God's number*. Se puede ver brevemente el procedimiento empleado en la demostración en [4].

Todo cubo resuelto al que se le aplique una permutación de H tendrá la forma que se muestra en la FIGURA 7 tras aplicar el siguiente cambio de pegatinas: cambiar amarillo por blanco, naranja por rojo, azul por verde y quitar las pegatinas de las esquinas que no sean blancas.

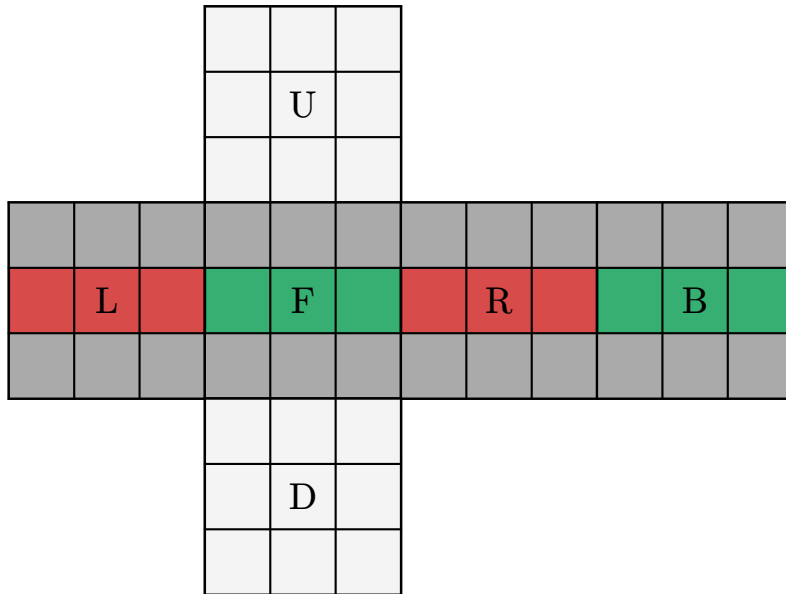
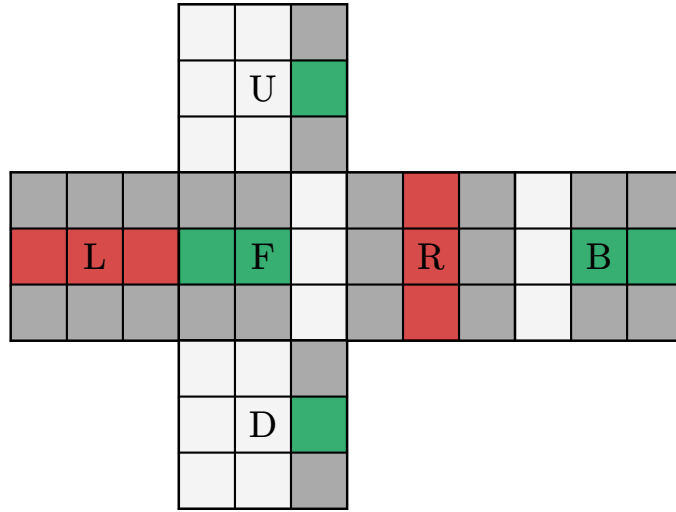


FIGURA 7: Cubo de Rubik invariante bajo H

La justificación para el cálculo de posiciones del cubo de Rubik se abordará en la SECCIÓN 6, de momento afirmamos sin justificación que el cubo invariante por H tiene $8!8!4!/2 = 19.508.428.800$. De este modo, en vez de comprobar cada configuración del cubo y encontrar la solución óptima, se estudia el conjunto de clases a derecha

$$\mathcal{R}/_H = \{H \cdot f \mid f \in \mathcal{R}\}$$

que particiona \mathcal{R} en $|\mathcal{R}|/|H| = 2.217.093.120$ clases de equivalencia donde hay que comprobar un solo representante, reduciendo drásticamente el coste computacional.

FIGURA 8: Clase lateral $HR = \{h \cdot R \mid h \in H\}$

Acción de \mathcal{R} sobre \mathcal{R}/H por multiplicación a derecha

$$\begin{aligned} \otimes : \mathcal{R}/_H \times \mathcal{R} &\longrightarrow \mathcal{R}/_H \\ (Hx, g) &\mapsto Hx \otimes g = H(xg) \end{aligned}$$

Veamos que está bien definida. Sean $Hx = Hy \in \mathcal{R}/H$, entonces existe $h \in H$ tal que $y = hx$ y por tanto, $Hx \otimes g = H(xg) = H(hxg) = H(yg) = Hy \otimes g$.

Desde el punto de vista del cubo de Rubik, cada clase lateral Hg representa un tipo de configuración caracterizado por el cubo invariante asociado a H . Aplicar un movimiento $g \in \mathcal{R}$ no altera la estructura interna de la clase, sino que transporta la configuración a otra clase lateral.

Se trata de una acción transitiva, pues solo tiene una órbita. Dados $Hg_1, Hg_2 \in \mathcal{R}/_H$, se tiene que $Hg_2 = H(g_1(g_1^{-1}g_2)) = Hg_1 \circledast g_1^{-1}g_2$

El estabilizador de la clase $H1 = H$ bajo esta acción es precisamente el subgrupo

$$\mathrm{Stab}_{\mathcal{R}}(H) = \{g \in \mathcal{R} \mid H \circ g = H\} = H$$

5. Restricciones estructurales

Hemos visto como se podía expresar el grupo de Rubik, \mathcal{R} , como un subgrupo de S_{48} , sin embargo, a la hora de estudiar la estructura del cubo y las restricciones bajo el grupo \mathcal{R} , conviene formalizarlo de otra manera.

Como se ha visto en SECCIÓN 4.1, la órbita de una posición de una esquina siempre es otra esquina, por tanto, considerando la acción de \mathcal{R} sobre el cubo, las esquinas forman una órbita y las aristas otras, por lo que podemos considerarlas por separado.

Por tanto, podemos considerar cada permutación como una permutación sobre las 12 aristas (S_{12}) y sobre las 8 aristas (S_8). Pero también tenemos que tener en cuenta las orientaciones.

- Las 8 esquinas admiten 3 orientaciones posibles.
- Las 12 aristas admiten 2 orientaciones posibles.
- Los centros permanecen fijos.

Por tanto, una permutación del cubo puede expresarse como un elemento de el siguiente conjunto bajo algunas restricciones.

$$X = S_{12} \times S_8 \times (\mathbb{Z}_3)^8 \times (\mathbb{Z}_2)^2$$

Proposición 5.0.1. (Restricción de orientación de vértices) La suma de las orientaciones de las esquinas, considerada módulo 3, debe ser nula. Esto implica que no es posible girar una única esquina de forma aislada.

$$\sum_{i=1}^8 v_i \equiv 0 \pmod{3}$$

Proposición 5.0.2. (Restricción de orientación de aristas) La suma de las orientaciones de las aristas, considerada módulo 2, también debe ser cero, lo que impide invertir una única arista sin afectar a otra.

$$\sum_{j=1}^{12} w_j \equiv 0 \pmod{2}$$

Proposición 5.0.3. (Restricción de paridad) Cada movimiento actúa como un 4-ciclo sobre aristas y un 4-ciclo sobre esquinas. Por tanto la signatura es impar para ambas y en general, las permutaciones inducidas por los mismos movimientos sobre las esquinas y las aristas deben tener la misma paridad.

$$\text{sig}(\pi) = \text{sig}(\rho)$$

En conjunto, estas tres restricciones caracterizan completamente el espacio de configuraciones resolubles del cubo de Rubik.

- Es trivial que todas la combinaciones alcanzables se encuentran en una 4-tupla de X , pues solo hemos añadido restricciones que se han comprobado
- Se nos podría haber olvidado alguna restricción, pero un algoritmo permite resolver cualquier configuración del cubo de Rubik dada por una 4-tupla.

Por tanto, puesto que existe inyección en ambos sentidos entre X y el conjunto de configuraciones válidas del cubo, tenemos una biyección y el orden es el mismo.

6. Cálculo del orden del grupo de Rubik

Una vez establecidas las restricciones estructurales, se puede calcular el número total de configuraciones distintas alcanzables del cubo de Rubik, que coincide con el orden del grupo, $|\mathcal{R}|$, y el orden de X con las restricciones:

1. $|S_{12}| \cdot |S_8| = 12! \cdot 8!$ pero solo una de cada dos $(\pi, \rho) \in S_{12} \times S_8$ cumple la [Proposición 5.0.3](#) $\Rightarrow 12! \cdot 8!/2$
2. $|(\mathbb{Z}_3)^8| = 3^8$ pero solo un tercio de los $\vec{v} \in (\mathbb{Z}_3)^8$ cumple la [Proposición 5.0.1](#) $\Rightarrow 3^7$
3. $|(\mathbb{Z}_2)^{12}| = 2^{12}$ pero solo un medio de los $\vec{w} \in (\mathbb{Z}_2)^{12}$ cumple la [Proposición 5.0.2](#) $\Rightarrow 2^{11}$

De este modo, multiplicando, obtenemos que el orden del grupo de Rubik es

$$|X| = \frac{8! \cdot 3^7 \cdot 12! \cdot 2^{11}}{2} = 43.252.003.274.489.856.000 \approx 4.3 \cdot 10^{19}$$

7. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el cubo de Rubik desde un enfoque algebraico, modelizándolo como un grupo generado por los movimientos básicos y analizando su acción sobre las configuraciones del cubo, observando como matemáticamente se puede facilitar la resolución de un problema computacional.

El uso de subgrupos, acciones y clases laterales ha permitido comprender las restricciones internas del cubo y justificar, desde un punto de vista teórico, la complejidad del problema de su resolución. En conjunto, el trabajo muestra cómo la teoría de grupos proporciona un marco adecuado para el análisis matemático del cubo de Rubik y conecta conceptos abstractos con un problema concreto y ampliamente conocido.

8. Bibliografía

- [1] R. Ingelbrecht, «Puzzle Generator: Rubik's Cube SVG Generator». [En línea]. Disponible en: <https://puzzle-generator.robinengelbrecht.be/cube>
- [2] G. Navarro Ortega, *Un curso de álgebra*, 2ª edición corregida y aumentada. València: Publicacions de la Universitat de València, 2016, p. 184.
- [3] K. Conrad, «The 15-Puzzle (and Rubik's Cube)». [En línea]. Disponible en: <https://kconrad.math.uconn.edu/blurbs/grouptheory/15puzzle.pdf>
- [4] T. Rokicki, H. Kociemba, M. Davidson, y J. Dethridge, «The Diameter of the Rubik's Cube Group is Twenty», *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, vol. 27, n.º 2, pp. 1082-1105, 2013, doi: [10.1137/120867366](https://doi.org/10.1137/120867366).