

Geometría Lineal

Álvaro García Tenorio

Clara Isabel López González

13 de noviembre de 2016

Índice general

1. Espacio Projectivo y Variedades Projectivas	4
1.1. El Espacio Projectivo	4
1.1.1. Primera Aproximación	4
1.1.2. Segunda Aproximación	4
1.1.3. Equivalencia de las Aproximaciones	5
1.1.4. Proyección Canónica	5
1.2. Variedades Projectivas	5
1.2.1. Operaciones con Variedades Projectivas	6
1.3. Dimensiones y Fórmula de Grassmann	7
1.3.1. Dimensiones y Fórmula de Grassmann	8
1.4. Referencias Projectivas	9
1.4.1. Coordenadas Homogéneas	9
1.4.2. Referencias Projectivas	9
1.4.3. Base Asociada a una Referencia Projectiva	10
1.5. Cambios de Referencia Projectiva	13
1.6. Problemas	15
2. Dualidad	16
2.1. Dualidad en espacios vectoriales	16
2.1.1. Formas Lineales e Hiperplanos	16
2.1.2. Dualidad Canónica	18
2.1.3. Principio de Dualidad	21
2.2. Dualidad en espacios projectivos	22
2.2.1. Formas Lineales e Hiperplanos Projectivos	22
2.2.2. Dualidad Canónica	23
2.2.3. Principio de Dualidad para espacios projectivos	24
3. Ecuaciones de Variedades Projectivas	26
3.1. Rectas Projectivas	26
3.1.1. Ecuaciones Paramétricas	26
3.1.2. Ecuación Implícita	28
3.1.3. Intersección de dos Rectas Projectivas	29
3.2. Planos Projectivos	30
3.2.1. Ecuaciones paramétricas	30
3.2.2. Ecuación implícita	31
3.3. Haz de hiperplanos	31
3.3.1. Haz de rectas	31
3.3.2. Haz de hiperplanos	34
3.4. Teorema de Pappus	34
4. Aplicaciones Projectivas	38
4.1. Definición	38
4.2. Propiedades Elementales	39
4.3. Proyecciones Cónicas	42
4.4. Homografías	45

4.4.1. Homografías y Teoría de Grupos	45
4.5. Aplicaciones Proyectivas y Matrices	46
4.5.1. Recordatorio de Álgebra Lineal	46
4.5.2. Matriz Asociada a una Aplicación Proyectiva	46
5. Razón Doble	50
5.1. Definición	50
5.2. Propiedades	53
5.3. Simetrías de la razón doble	55
6. Clasificación de homografías	58
6.1. Clasificación de homografías de \mathbb{P}^1 . Puntos fijos	58
6.1.1. Dos puntos fijos distintos	58
6.1.2. Un punto fijo doble	60
6.2. Formas canónicas de Jordan y puntos fijos	61
6.3. Aplicaciones afines	63
6.3.1. Aplicaciones afines y homografías de \mathbb{P}^n	64
6.4. Involuciones	66
6.4.1. Haz de ecuaciones de segundo grado	68
A. Álgebra Lineal	69
A.1. Coordenadas en Espacios Vectoriales	69
A.1.1. Matriz de Cambio de Base	70
A.2. Ecuaciones de Subespacios	71
A.2.1. Existencia de las Ecuaciones Cartesianas	71
A.3. Dualidad	73
B. Mierdas varias	75

Prefacio

Estas notas son una transcripción (reorganizada y con muchos añadidos) de las clases de la asignatura *Geometría Lineal*, impartidas por Antonio Valdés, y sus sustitutos, entre los que se contaban un esquizofrénico que no sabía por qué oía voces y un clon de Felipe González con pendiente, en el curso 2016–2017 a los cursos de tercero de los dobles grados de matemáticas e informática y matemáticas y física en la facultad de Ciencias Matemáticas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Se han incluido demostraciones que usualmente se dan por evidentes y algunas aclaraciones de otros textos que consideramos importantes para un correcto seguimiento de una asignatura como esta.

Consideramos un requisito indispensable para seguir estas notas haber entendido bien el álgebra lineal, no obstante, se incluye un anexo con los conocimientos que consideramos indispensables, para evitar que el lector tenga que desempolvar con demasiada frecuencia la bibliografía del primer curso.

Agradecimientos

Agradecemos las grandes aportaciones de Iván Prada a la hora de ilustrar este texto, así como para ayudar a limpiarlo de errores y erratas.

Capítulo 1

Espacio Proyectivo y Variedades Proyectivas

1.1. El Espacio Proyectivo

Sea E un \mathbb{K} -espacio vectorial arbitrario.

Podemos realizar dos aproximaciones equivalentes a la noción de espacio proyectivo, que confundiremos según nos convenga. Cabe destacar que la segunda de estas aproximaciones tiene especial interés en la *topología*, por estar basada en conjuntos cociente.

1.1.1. Primera Aproximación

Definición 1.1.1 (Espacio Proyectivo). Se define el *espacio proyectivo* asociado a E como el conjunto de los subespacios vectoriales de dimensión 1 de E . Lo denotaremos por $\mathbb{P}(E)$.

Expresando el contenido de la definición 1.1.1 con una notación conjuntista obtenemos lo siguiente.

$$\mathbb{P}(E) \stackrel{\text{def.}}{=} \{[u] \mid u \in E \setminus \{0\}\} \quad (1.1)$$

En la ecuación (1.1) hay una notación implícita que pasamos a explicar a continuación.

Definición 1.1.2 (Rayo). Sea $u \in E \setminus \{0\}$, se denomina *rayo* engendrado por u al conjunto de todos los vectores proporcionales a u , es decir:

$$[u] \stackrel{\text{def.}}{=} \{\lambda u \mid \lambda \in \mathbb{K}\}$$

Consideraremos, a partir de ahora, a los rayos como los *puntos* del espacio proyectivo.

Antes de continuar, notemos algunos casos curiosos.

Observación 1.1.1 (Casos Extremos). 1. Si $E = \{0\}$ entonces, por definición $\mathbb{P}(E) = \emptyset$, ya que no hay ningún subespacio de dimensión 1.
2. Si $\dim(E) = 1$ entonces $\mathbb{P}(E)$ consta de un único elemento, el rayo generado por el vector de la base de E (o cualquier otro no nulo).

◇

1.1.2. Segunda Aproximación

La definición 1.1.1 tiene una traducción natural en términos de relaciones de equivalencia y conjuntos cociente.

Definición 1.1.3 (Relación de Proporcionalidad). Se comprueba inmediatamente que la relación \mathcal{R} definida en $E \setminus \{0\}$ como:

$$u\mathcal{R}v \stackrel{\text{def.}}{\iff} \exists \lambda \in \mathbb{K}^* \mid u = \lambda v$$

es de equivalencia, siendo la clase de equivalencia de un vector v el conjunto de todos los proporcionales a él, es decir el *cuasirayo* generado por v (rayo al que se le ha sustraído el 0).

La clase del vector u según la relación de equivalencia definida en 1.1.3 será denotada por $u\mathcal{R}$. Es trivial ver que se cumple:

$$u\mathcal{R} = [u] \setminus \{0\}$$

Definición 1.1.4 (Espacio Projectivo). Definimos espacio projectivo asociado a E como el conjunto de las clases de equivalencia de \mathcal{R} , es decir, el conjunto cociente $\frac{E \setminus \{0\}}{\mathcal{R}}$.

1.1.3. Equivalencia de las Aproximaciones

Veamos ahora que, intuitivamente, podemos confundir ambas aproximaciones a la noción de espacio projectivo, estableciendo una biyección entre los conjuntos resultantes de las definiciones 1.1.1 y 1.1.4. La aplicación natural entre ambos conjuntos es la de asociar al cuasirayo engendrado por un vector su rayo correspondiente, es decir:

$$\begin{array}{ccc} \frac{E \setminus \{0\}}{\mathcal{R}} & \xrightarrow{\Phi} & \mathbb{P}(E) \\ u\mathcal{R} & \mapsto & [u] \end{array} \quad (1.2)$$

Ver que es una biyección y que está bien definida es un ejercicio fácil que se deja al lector.

1.1.4. Proyección Canónica

Una nueva forma muy útil de identificar el espacio projectivo asociado a E es mediante la imagen de la llamada *proyección canónica*, que es la aplicación (evidentemente sobreyectiva) que a cada vector le asocia su rayo engendrado.

$$\begin{array}{ccc} E \setminus \{0\} & \xrightarrow{\pi} & \mathbb{P}(E) \\ u & \mapsto & [u] \equiv u\mathcal{R} \end{array} \quad (1.3)$$

1.2. Variedades Projectivas

Como es típico en álgebra, trataremos de estudiar los subconjuntos de una estructura que mantienen dicha estructura, en este caso, estudiaremos las variedades o subespacios de espacios projectivos. Este es un concepto que puede resultar lioso en una primera lectura, pero que es de importancia crucial.

Definición 1.2.1 (Variedad Projectiva). Dado un subconjunto X de un espacio projectivo $\mathbb{P}(E)$, se dirá que X es una variedad projectiva de $\mathbb{P}(E)$ si existe una variedad lineal de E , a la que llamaremos \hat{X} de manera que el espacio projectivo asociado a \hat{X} coincide con X . Escrito de otra forma:

$$X = \mathbb{P}(\hat{X}) = \pi(\hat{X} \setminus \{0\})$$

El siguiente lema demuestra que hay dos enfoques equivalentes a la idea de variedad projectiva. Es muy probable que la demostración pueda reducirse mucho.

Lema 1.2.1 (Caracterización de las Variedades). X es variedad projectiva si y solo si $\pi^{-1}(X) \cup \{0\}$ es un subespacio vectorial de E .

Demostración. \Rightarrow Para esta implicación basta ver que $\pi^{-1}(X) \cup \{0\}$ es un subespacio vectorial.

Como X es variedad projectiva existe cierta variedad lineal \hat{X} de forma que $\pi(\hat{X} \setminus \{0\}) = X$. Si Dios existe y está de nuestra parte se tendrá $\hat{X} = \pi^{-1}(X) \cup \{0\}$, con lo que habríamos terminado. En efecto, la igualdad que queremos obtener es equivalente (quitando el cero y aplicando la proyección canónica) a la igualdad $\pi(\hat{X}) = \pi(\pi^{-1}(X)) = X$, lo cual tenemos por hipótesis.

◁ Si $\pi^{-1}(X) \cup \{0\}$ es un espacio vectorial, su proyectivo asociado será $\pi(\pi^{-1}(X)) = X$, con lo que hemos encontrado una variedad lineal de E de forma que X es su espacio proyectivo asociado. Por la definición 1.2.1 hemos terminado. ■

Del lema 1.2.1 se deduce que los subespacios vectoriales de E y los subespacios proyectivos de $\mathbb{P}(E)$ están en biyección, siendo este un resultado análogo al del llamado *lema de la correspondencia* de la teoría de grupos y anillos. Estudiemos más a fondo este hecho.

Observación 1.2.1 (Lema de la Correspondencia). Sea \mathcal{P} el conjunto de las variedades proyectivas de $\mathbb{P}(E)$. Asimismo sea el conjunto \mathcal{L} compuesto por las variedades lineales de E . Es claro, por la definición de variedad proyectiva 1.2.1 y por el lema 1.2.1 que la siguiente aplicación es una biyección.

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{P} & \xrightarrow{\Phi} & \mathcal{L} \\ X & \mapsto & \pi^{-1}(X) \cup \{0\} \end{array}$$

Aunque trivial, es recomendable recordar, que se preservan las contenciones, es decir:

$$X \subset Y \Leftrightarrow \pi^{-1}(X) \subset \pi^{-1}(Y)$$

◇

1.2.1. Operaciones con Variedades Proyectivas

Tras estas observaciones estamos en condiciones de abordar dos problemas elementales pero importantes. Estos son:

1. Determinar si la intersección de variedades proyectivas es variedad proyectiva.
2. Obtener una descripción explícita de los elementos que conforman la mínima variedad que contiene a un subconjunto del espacio proyectivo.

Lema 1.2.2 (Intersección de Variedades Proyectivas). *Sea la familia de variedades proyectivas $\{X_i \mid i \in I\}$, se tiene que la intersección $\bigcap_{i \in I} X_i$ es una variedad proyectiva.*

Además, se verifica $\hat{X} = \bigcap_{i \in I} \hat{X}_i$

Demostración. Debemos demostrar que $\bigcap_{i \in I} X_i$ es variedad proyectiva. Esto pasa, por el lema 1.2.1 si y solo si $\pi^{-1}(\bigcap_{i \in I} X_i) \cup \{0\}$ es un espacio vectorial. Si tenemos suerte, se cumplirá que $\pi^{-1}(\bigcap_{i \in I} X_i) = \bigcap_{i \in I} \pi^{-1}(X_i)$. Supongamos que tenemos suerte, en tal caso, por ser cada X_i una variedad proyectiva y por tanto $\pi^{-1}(X_i) \cup \{0\}$ un subespacio vectorial, y por ser la intersección arbitraria de espacios vectoriales un espacio vectorial, se tiene que $\pi^{-1}(\bigcap_{i \in I} X_i) \cup \{0\}$ es un subespacio vectorial, como queríamos demostrar.

Finalmente, comprobemos que, efectivamente, hemos tenido suerte.

$$\begin{aligned} x \in \pi^{-1}\left(\bigcap_{i \in I} X_i\right) &\Leftrightarrow \pi(x) = [x] \in \bigcap_{i \in I} X_i \Leftrightarrow [x] \in X_i \quad \forall i \in I \Leftrightarrow \\ &\pi^{-1}([x]) = x \in \pi^{-1}(X_i) \quad \forall i \in I \Leftrightarrow x \in \bigcap_{i \in I} \pi^{-1}(X_i) \end{aligned}$$

con lo que se obtiene la igualdad deseada.

El *además* se obtiene muy fácilmente:

$$\hat{X} = \pi^{-1}\left(\bigcap_{i \in I} X_i\right) \cup \{0\} = \bigcap_{i \in I} \pi^{-1}(X_i) \cup \{0\} = \bigcap_{i \in I} \hat{X}_i$$

■

Con el lema 1.2.2 queda resuelto el primer problema planteado en esta sección. Pasemos ahora a estudiar la noción de variedad proyectiva engendrada por un subconjunto cualquiera A de $\mathbb{P}(E)$ así como sus propiedades.

Definición 1.2.2 (Variedad Engendrada por un Subconjunto). Sea $A \subset \mathbb{P}(E)$ no vacío. Se define la *variedad proyectiva engendrada por A* al menor subespacio proyectivo que contiene a A . A esta, se la denotará por $\mathcal{V}(A)$.

Vamos a demostrar la existencia de dicha variedad construyéndola mediante un truco muy habitual en matemáticas.

Observación 1.2.2 (Existencia de la Variedad Engendrada). Sea \mathcal{L} la familia de las variedades proyectivas de $\mathbb{P}(E)$ que contienen a A . Es trivial demostrar que $\bigcap_{X \in \mathcal{L}} X$ es la menor variedad proyectiva que contiene a A .

Que es variedad proyectiva es evidente por el lema 1.2.2. Es la menor variedad ya que, dada cualquier otra variedad que contenga a A , esta pertenecerá a la familia \mathcal{L} , por lo que su intersección estará contenida en la variedad. \diamond

La 1.2.2 demuestra la existencia de la variedad engendrada de la misma forma que demostramos la existencia de un subespacio vectorial engendrado por un conjunto, o del subgrupo generado por un conjunto, lo que deja claro la importancia de este truco. Sin embargo, esta demostración no nos da una descripción explícita de los elementos de la variedad.

Una forma de resolver este problema es, a la luz del lema 1.2.1, encontrar la variedad lineal asociada a la variedad engendrada.

Lema 1.2.3 (Variedad Lineal Asociada a una Variedad Engendrada). *Se tiene que*

$$\widehat{\mathcal{V}(A)} = \mathcal{L}(\pi^{-1}(A))$$

Es decir, la variedad lineal asociada a la variedad proyectiva engendrada por A es aquella que engendra la preproyección de A sobre E .

Demostración. \square Como $A \subset \mathcal{V}(A)$ entonces $\pi^{-1}(A) \subset \widehat{\mathcal{V}(A)} \Rightarrow \mathcal{L}(\pi^{-1}(A)) \subset \widehat{\mathcal{V}(A)}$

\square $A \subset \pi(\mathcal{L}(\pi^{-1}(A)))$ ya que $\mathcal{L}(\pi^{-1}(A)) \supset \pi^{-1}(A)$. Como $\mathcal{L}(\pi^{-1}(A))$ es un subespacio vectorial, su proyectivizado será una subvariedad proyectiva X , por lo cual $X = \pi(\mathcal{L}(\pi^{-1}(A)))$. Como por la primera desigualdad conjuista de esta segunda parte de la demostración nos dice que $A \subset X$, tenemos la desigualdad:

$$A \subset \mathcal{V}(A) \subset X = \pi(\mathcal{L}(\pi^{-1}(A)))$$

Aplicando π^{-1} a la desigualdad obtenemos:

$$\pi^{-1}(\mathcal{V}(A)) = \widehat{\mathcal{V}(A)} \setminus \{0\} \subset \mathcal{L}(\pi^{-1}(A)) \setminus \{0\}$$

■

El lema 1.2.3 nos da una descripción explícita de los elementos de la variedad engendrada por un conjunto, basta aplicar la proyección canónica para obtener:

$$\mathcal{V}(A) = \pi(\mathcal{L}(\pi^{-1}(A))) \quad (1.4)$$

Tengamos especialmente en cuenta el caso de las variedades engendradas por conjuntos finitos.

Ejemplo 1.2.1 (Variedades Engendradas por Conjuntos Finitos). Sea $A = \{p_1, \dots, p_n\}$, denotaremos $\mathcal{V}(A) = \mathcal{V}(p_1, \dots, p_n)$, escogiendo un representante arbitrario para cada $p_i = [u_i]$ obtenemos, por 1.4 que

$$\mathcal{V}(p_1, \dots, p_n) = \pi(\mathcal{L}(u_1, \dots, u_n))$$

\diamond

1.3. Dimensiones y Fórmula de Grassmann

Prosiguiendo en nuestra traducción de los conceptos del mundo vectorial al idioma proyectivo introduciremos el concepto de dimensión de un espacio proyectivo y deduciremos la llamada fórmula de Grassmann.

1.3.1. Dimensiones y Fórmula de Grassmann

Es importante tener claro que los espacios proyectivos **no** son espacios vectoriales, ya que no hemos definido la noción de suma de rayos o producto de rayos por escalares. Sin embargo, parece razonable extender la noción de dimensión a los espacios proyectivos.

Intuitivamente, al considerar las rectas vectoriales como puntos, estamos, entre comillas, perdiendo un grado de libertad. Esta idea es recogida por la siguiente definición.

Definición 1.3.1 (Dimensión de un Espacio Proyectivo). Si E es un espacio vectorial de dimensión n , se define la dimensión de $\mathbb{P}(E)$ como $n - 1$. Es decir, la *codimensión* de un espacio proyectivo respecto de su espacio lineal asociado es 1.

Usualmente nos referiremos a los espacios proyectivos de dimensión 1 como *rectas proyectivas*, a los de dimensión 2 como *planos proyectivos* y a los de dimensión 3 como *espacios proyectivos*.

Es importante distinguir algunos casos extremos que pueden parecer chocantes.

Observación 1.3.1 (Casos Extremos). 1. Si E es un espacio vectorial de dimensión 1, entonces $\mathbb{P}(E)$ tiene dimensión nula, lo cual tiene sentido al estar conformado por un solo punto.
2. Si $E = \{0\}$, es decir, un espacio vectorial de dimensión 0, resulta que su espacio proyectivo tiene dimensión -1 .

◇

Estamos ahora en condiciones de presentar el ejemplo de *espacio canónico*, cuya notación no hubiéramos entendido hasta ahora.

Ejemplo 1.3.1 (Espacio Canónico). El espacio proyectivo asociado a un espacio vectorial de la forma $E = \mathbb{K}^{n+1}$ se denomina *espacio canónico* y se denota por:

$$\mathbb{P}(E) \stackrel{\text{not.}}{=} \mathbb{P}^n$$

◇

Una igualdad recurrente en matemáticas es la llamada *fórmula de Grassmann*, que se presenta con diversas versiones en áreas tan dispersas de las matemáticas como la teoría de conjuntos, la probabilidad, la teoría de grupos, el álgebra lineal,... Como no podía ser de otra manera, también está presente en los espacios proyectivos.

Teorema 1.3.1 (Fórmula de Grassmann, Teorema de la Incidencia). Sean $X, Y \subset \mathbb{P}(E)$ dos variedades proyectivas. Se tiene que:

$$\dim(\mathcal{V}(X, Y)) = \dim(X) + \dim(Y) - \dim(X \cap Y)$$

Demostración. Apoyándonos en la fórmula de Grassmann para espacios vectoriales, sale fácilmente. En efecto, como

$$\dim(\mathcal{V}(X, Y)) = \dim(\widehat{\mathcal{V}(X, Y)}) - 1$$

y además

$$\dim(X) + \dim(Y) - \dim(X \cap Y) = \dim(\widehat{X}) - 1 + \dim(\widehat{Y}) - 1 - \dim(\widehat{X \cap Y}) + 1$$

por la fórmula de Grassmann en espacios vectoriales sabemos que los dos miembros de la derecha de sendas igualdades coinciden. ■

Este teorema arroja un corolario importante, del que debemos extraer la idea de que en los espacios proyectivos las cosas se cortan muy fácilmente. Es por esto que se conoce a la geometría proyectiva como *geometría de la incidencia*.

Corolario 1.3.2 (Hiperplanos y Rectas). Una recta y un hiperplano proyectivos siempre se cortan.

Demostración. Basta sustituir las dimensiones en la fórmula de Grassmann teniendo en cuenta que $\dim(\mathbb{P}(E)) \geq \dim(\mathcal{V}(X, Y))$, despejando se concluye que $\dim(\mathcal{V}(X, Y)) \geq 0$, y por tanto hay al menos un punto común. ■

1.4. Referencias Projectivas

En esta sección trataremos de extrapolar el concepto de *base* de un espacio vectorial a los espacios proyectivos.

Sea E un \mathbb{K} -espacio vectorial cualquiera de dimensión $n + 1$. Sabemos por álgebra lineal que, dada $\mathcal{B} := \{e_0, \dots, e_n\}$ una base de E , cualquier vector $x \in E$ puede escribirse de manera única como combinación lineal de los vectores que conforman la base, es decir, para ciertos λ_i con $i \in \{0, \dots, n\}$ se tiene:

$$x = \sum_{i=0}^n \lambda_i e_i \stackrel{\text{not.}}{\equiv} (\lambda_0, \dots, \lambda_n)_{\mathcal{B}} \stackrel{\text{not.}}{\equiv} \mathcal{B}X \quad (1.5)$$

Nótese que la tercera equivalencia de la ecuación (1.5), es un mero abuso de notación muy extendido para hacer la notación más compacta.

Volviendo al mundo proyectivo, queremos encontrar cierta colección de puntos proyectivos en función de los cuales poder escribir todos los demás.

1.4.1. Coordenadas Homogéneas

Si tomamos un punto proyectivo $x := [u]$, por la ecuación (1.5) podremos escribir:

$$x : [u] = [(\lambda_0, \dots, \lambda_n)_{\mathcal{B}}] \stackrel{\text{not.}}{\equiv} (\lambda_0 : \dots : \lambda_n) \quad (1.6)$$

Al último miembro de la ecuación (1.6) se le llama *escritura de x en coordenadas homogéneas*.

Nótese que, **fijada una base**, las coordenadas homogéneas de un punto proyectivo son únicas salvo proporcionalidad, ya que si se toma un representante u' distinto del rayo vectorial, su escritura respecto de la base \mathcal{B} será proporcional a la de u (los representantes son múltiplos entre sí).

Con esto podría decirse que hemos cumplido el objetivo de la sección, ya que, dada una base de E , podemos escribir en función de ella a cualquier punto proyectivo.

Sin embargo, estamos creando una referencia en base a otra ya existente, lo cual no es muy recomendable salvo si nuestra referencia base (base del espacio vectorial) es *estándar* o *canónica*, lo cual sólo ocurre en contadas ocasiones, por ejemplo, en los espacios canónicos.

1.4.2. Referencias Projectivas

Para evitar los problemas derivados de la aproximación presentada en el apartado anterior, debemos concentrarnos en la idea de que lo que debemos hacer es encontrar una colección de elementos del espacio proyectivo en función de los cuales poder escribir todos los demás. A ese conjunto de puntos lo llamaremos *referencia projectiva*.

Definición 1.4.1 (Independencia Projectiva). Sea un conjunto $\{p_0, \dots, p_r\} \subset \mathbb{P}(E)$, diremos que son *projectivamente independientes* si ninguno de ellos está en la variedad projectiva engendrada por los restantes.

Con un poco de trabajo adicional extraemos la siguiente caracterización de la independencia projectiva.

Lema 1.4.1 (Caracterización de la Independencia Projectiva). *Un conjunto de puntos proyectivos es projectivamente independiente si y solo si sus representantes (cualesquiera) son linealmente independientes, sin depender de la elección de los mismos.*

Demostración. Decir que los representantes son linealmente independientes es equivalente a decir que, dado uno de ellos, no puede ser expresado como combinación lineal de los restantes y por ende no se encuentra en la variedad lineal engendrada por estos. Por la ecuación (1.4) sabemos que:

$$u_i \notin \mathcal{L}(u_0, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_r) \Leftrightarrow [p_i] \notin \mathcal{V}(p_0, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_r)$$

■

Observación 1.4.1 (Base Inducida). En un espacio proyectivo de dimensión n , podemos escoger (como mucho) un conjunto de $n+1$ puntos proyectivamente independientes, ya que, para cualquier elección de representantes de estos puntos, se obtendrían $n+1$ vectores linealmente independientes del espacio vectorial asociado E , de dimensión $n+1$, en el cual estos vectores, por definición formarían una base a la que llamaremos *base inducida*. \diamond

Hay un gran problema con la definición 1.4.1, y es que, dados $n+1$ puntos proyectivos, inducimos una familia de bases de E demasiado “grande”. Con grande nos referimos a que no solo inducimos una base junto con todas las proporcionales a ella (resultantes de aplicarle el mismo factor de escala a todos sus vectores), sino muchas más.

Observación 1.4.2 (No Unidad de la Base Inducida). Dada una elección de representantes $\{u_0, \dots, u_n\}$ que son una base de E , entonces, el conjunto de representantes $\{\lambda_0 u_0, \dots, \lambda_n u_n\}$, con $\lambda_i \in \mathbb{K}^*$ también conforma una base de E . \diamond

Para solucionar este problema deberemos añadir alguna restricción más a la definición de base inducida.

Definición 1.4.2 (Referencia Proyectiva). Dado un espacio proyectivo de dimensión n , una *referencia proyectiva* es un conjunto **ordenado** \mathfrak{R} de $n+2$ puntos de tal forma que cada $n+1$ de ellos son proyectivamente independientes.

A pesar de ser una referencia proyectiva un conjunto ordenado normalmente lo escribiremos con la notación usual para conjuntos.

Observación 1.4.3 (Reordenación). Dada una referencia \mathfrak{R} , cualquier reordenación de la misma sigue siendo referencia proyectiva. \diamond

Ejemplo 1.4.1 (Referencias Proyectivas en Dimensiones Bajas). 1. En caso de querer dar una referencia de la recta proyectiva deberemos elegir tres puntos proyectivamente independientes dos a dos.

2. Si queremos referenciar el plano proyectivo deberemos dar lo que se llama *triángulo de referencia*, es decir, una elección de cuatro puntos proyectivamente independientes tres a tres. Esto es equivalente a decir que, para cualquier elección de tres puntos, estos formen un triángulo no degenerado.

3. La misma idea se extrapola al espacio proyectivo, donde habría que escoger un *tetraedro de referencia*.

Para dimensiones más altas se hablará de *hipertetraedros de referencia*. \diamond

1.4.3. Base Asociada a una Referencia Proyectiva

Siguiendo la idea de las observaciones 1.4.1 y 1.4.2 vamos a estudiar las propiedades de las llamadas *bases asociadas* a referencias proyectivas.

Definición 1.4.3 (Base Asociada). Una base \mathcal{B} de E se dice *asociada* a la referencia proyectiva \mathfrak{R} si sus vectores son representantes de los $n+1$ primeros puntos proyectivos, y además, la suma de sus vectores es representante del último de los puntos.

Nótese que una base asociada no es más que una base inducida con una pequeña restricción más, con la suerte de que esta es fundamental para solucionar el problema de la no unicidad salvo proporcionalidad, tal y como muestra el siguiente teorema, cuya demostración constituye un **método de construcción de bases asociadas**.

Teorema 1.4.2 (Unicidad de la Base Asociada). *Para cada referencia proyectiva \mathfrak{R} de $\mathbb{P}(E)$ hay una base asociada única salvo un factor no nulo común a todos los elementos de la base.*

Demostración. 1. Probemos la **existencia** de dicha base. Dada una referencia proyectiva \mathfrak{R} , tomemos representantes de cada uno de los puntos. Por ser \mathfrak{R} referencia proyectiva y por el lema 1.4.1 los representantes de los $n+1$ primeros puntos forman una base de E , y por ende

el representante del último punto puede escribirse como combinación lineal de los anteriores. Denotando por u_i al representante escogido para el i -ésimo punto se tiene que:

$$u_{n+1} = \sum_{i=0}^n a_i u_i$$

Veamos que $\mathcal{B} = \{a_i u_i \mid 0 \leq i \leq n\}$ es una base de E y además sus vectores son representantes de los $n+1$ primeros puntos de \mathfrak{R} . Esto es debido a que ninguno de los coeficientes a_i es nulo. Si alguno lo fuera, por ejemplo $a_0 = 0$, se tendríamos la relación:

$$u_{n+1} = \sum_{i=1}^n a_i v_i \in \mathcal{L}(v_1, \dots, v_n)$$

Lo cual va contra la hipótesis de independencia proyectiva. Además, la suma de sus vectores es un representante del último punto de la referencia. Luego \mathcal{B} es base asociada a \mathfrak{R} .

2. Para demostrar la unicidad supongamos la existencia de dos bases asociadas:

$$\begin{aligned}\mathcal{B} &:= \{u_0, \dots, u_n\} \\ \mathcal{B}' &:= \{u'_0, \dots, u'_n\}\end{aligned}$$

Instantáneamente se ve que $u'_i = u_i \lambda_i$ para algún $\lambda \in \mathbb{K}^*$ para todos los $i \in \{0, \dots, n\}$, ya que si no no serían representantes de los primeros elementos de la referencia. Además, se debe dar la condición:

$$\left[\sum_{i=0}^n u_i \right] = \left[\sum_{i=0}^n u'_i \right]$$

y por ende las sumas deben ser proporcionales, de lo que se desprende:

$$\sum_{i=0}^n u'_i = \sum_{i=0}^n u_i \lambda_i = \lambda \sum_{i=0}^n u_i$$

Es decir, las bases son proporcionales. ■

La comprobación de que un conjunto ordenado de $n+2$ puntos es referencia proyectiva puede ser muy tediosa ya que consiste en realizar $\binom{n+2}{n+1} = n+2$ determinantes de orden $n+1$. El lema 1.4.3 es extramadamente útil pues reduce esta comprobación al cálculo de un determinante de orden $n+1$ y a la inversión de una matriz de orden $n+1$.

Lema 1.4.3 (Comprobación de Referencias Proyectivas). *Para comprobar que $n+2$ puntos proyectivos $x_i = [v_i]$ conforman una referencia proyectiva basta comprobar las siguientes condiciones:*

1. Los $n+1$ primeros puntos son proyectivamente independientes.

2. Al escribir $v_{n+1} = \sum_{i=0}^n \lambda_i v_i$ se tiene que $\lambda_i \neq 0 \forall 0 \leq i \leq n$

Demostración. Si se cumplen las condiciones del enunciado se tiene que $\{\lambda_0 u_0, \dots, \lambda_n u_n\}$ es una base de E . Si a este conjunto le añadimos v_{n+1} , sabemos por álgebra lineal que es un conjunto linealmente dependiente y un sistema de generadores de E . Por ende, alguno de los vectores del conjunto puede ponerse como combinación lineal de los demás, y extrayendo este elemento del conjunto, este seguirá siendo sistema de generadores. Obviamente, v_{n+1} puede ponerse como combinación lineal de los demás, pero esto no nos ayuda. Lo interesante es, que como todos los coeficientes λ_i son no nulos, podemos despejar cualquier v_i de la ecuación, de esta forma:

$$v_{n+1} = \sum_{i=0}^n \lambda_i v_i \Leftrightarrow v_i = \sum_{j \neq i, n+1} \frac{\lambda_j}{-\lambda_i} u_j + \frac{1}{\lambda_i} u_{n+1}$$

Entonces podemos formar $\binom{n+2}{n+1} = n+2$ conjuntos diferentes de $n+1$ vectores, si todos ellos formaran bases habríamos terminado, pero esto es evidente, ya que son sistemas de generadores de $n+1$ elementos, es decir, bases. ■

Para clarificar un poco las cosas se presenta el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1.4.2 (Referencia de \mathbb{P}^2). En \mathbb{P}^2 nos dan los puntos:

$$\begin{aligned} a_0 &= (1 : 0 : 1), \quad a_1 = (0 : 2 : 1) \\ a_2 &= (0 : 0 : 1), \quad a_3 = (1 : -1 : 0) \end{aligned}$$

Donde las coordenadas homogéneas vienen dadas según la base estándar de \mathbb{R}^3 .

Se pide estudiar si dichos puntos conforman una referencia proyectiva.

Siguiendo el lema 1.4.3 para ahorrarnos cálculos, vemos que los representantes de a_0 , a_1 y a_2 son una base de \mathbb{R}^3

$$u_0 = (1, 0, 1), \quad u_1 = (0, 2, 1), \quad u_2 = (0, 0, 1)$$

En efecto, al calcular el determinante:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \neq 0$$

Ahora, tomando $u_3 = (1, -1, 0)$ como representante de a_3 , bastaría resolver el sistema de ecuaciones lineales (que sabemos compatible determinado) dado por:

$$\alpha u_0 + \beta u_1 + \gamma u_2 = u_3$$

Si la matriz columna solución no tiene ningún coeficiente nulo la colección de puntos original conforma una referencia proyectiva de base asociada dada por el método de construcción de bases asociadas (teorema 1.4.2), es decir, la base asociada sería:

$$\mathcal{B} = \{\alpha u_0, \beta u_1, \gamma u_2\}$$

Con un poquito de magia se obtiene que:

$$\alpha = 1, \quad \beta = -\frac{1}{2}, \quad \gamma = -\frac{1}{2}$$

Como no son todos nulos, los puntos originales conforman una referencia proyectiva.

Una base asociada sería:

$$\mathcal{B} = \left\{ (1, 0, 1), \left(0, -1, -\frac{1}{2}\right), \left(0, 0, -\frac{1}{2}\right) \right\}$$

Como esta base es única salvo proporcionalidad, podríamos multiplicar todo por 2 para que nos queda algo más bonito.

$$\mathcal{B}' = \{(2, 0, 2), (0, -2, -1), (0, 0, -1)\}$$

◇

Antes de continuar, fijemos una notación para referirnos a referencias proyectivas.

Dada una referencia proyectiva \mathfrak{R} , la denotaremos por los puntos que la conforman de la siguiente manera:

$$\mathfrak{R} = \{p_0, \dots, p_n; e\} \tag{1.7}$$

Donde e representa el último punto al que llamaremos *punto unidad*.

Definición 1.4.4 (Coordenadas Homogéneas Respecto de una Referencia \mathfrak{R}). Dado un punto proyectivo $p \in \mathbb{P}(E)$ y una referencia proyectiva \mathfrak{R} , se dice que $p = (x_0 : \dots : x_n)_{\mathfrak{R}}$ si, para cualquier elección de u (representante del rayo p) y cualquier elección de base asociada \mathcal{B} a \mathfrak{R} , se tiene que:

$$u = \lambda(x_0, \dots, x_n)_{\mathcal{B}}$$

Es evidente, por lo visto en la sección 1.4.1 y en el teorema 1.4.2, que la definición 1.4.4 es sólida.

1.5. Cambios de Referencia Projectiva

Cuando realizábamos cambios de base en álgebra lineal nos preguntábamos cuáles eran las relaciones entre las coordenadas de un vector respecto de una y otra base. Bajando al mundo proyectivo nos hacemos la misma pregunta. ¿Cómo cambian las coordenadas homogéneas de un punto al realizar cambios en la referencia projectiva?

Sean dos referencias projectivas \mathfrak{R} y \mathfrak{R}' , las cuales tendrán sendas bases asociadas \mathcal{B} y \mathcal{B}' (únicas salvo múltiplos) (teorema 1.4.2).

Sea un punto $x \in \mathbb{P}(E)$. Es claro que podemos expresar este punto en coordenadas homogéneas respecto de la referencia \mathfrak{R} de la siguiente manera:

$$x = [u] = [(\alpha_0, \dots, \alpha_n)_{\mathcal{B}}]$$

Asimismo también es claro que x admite una representación en términos de la referencia \mathfrak{R}' :

$$x = [u] = [(\beta_0, \dots, \beta_n)_{\mathcal{B}'}]$$

Un problema que se presenta habitualmente es, conocida la representación de un vector respecto de cierta referencia \mathfrak{R} , ¿cómo obtengo la representación respecto de otra referencia \mathfrak{R}' de mi elección?

Solucionemos este problema aplicando lo que ya sabemos de álgebra lineal. Antes de comenzar, fijemos notaciones:

$$\begin{aligned} u &= \mathcal{B}X \equiv (\alpha_0, \dots, \alpha_n)_{\mathcal{B}} \\ u &= \mathcal{B}'X' \equiv (\beta_0, \dots, \beta_n)_{\mathcal{B}'} \end{aligned}$$

Donde los símbolos \mathcal{B} y \mathcal{B}' representan las matrices fila que contienen los vectores de las bases \mathcal{B} y \mathcal{B}' respectivamente. Asimismo, los símbolos X y X' representan las matrices columna de los coeficientes α_i (conocidos) y β_i (desconocidos) respectivamente. Nótese que es esto es un abuso de notación, ya que no hemos definido el producto de dos matrices de estos tipos.

Como sabemos (A.1.1), se cumplen las llamadas “ecuaciones del cambio de base”, que dicen:

$$X' = P^{-1}X$$

Donde P es la matriz cuyas columnas son las coordenadas de los vectores de la base \mathcal{B}' respecto de la base \mathcal{B} . Así pues, basta poner X' en “formato de coordenadas” para poder decir que hemos encontrado una representación (única salvo múltiplos) del punto x en base a la referencia \mathfrak{R}' .

Un ejemplo clarificará todos estos cambalaches.

Ejemplo 1.5.1 (Cambio de Referencia Projectiva). Se considera el plano proyectivo \mathbb{P}^2 y las referencias projectivas:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &:= \{(2 : 0 : -1), (1 : -1 : 0), (1 : -1 : 1); (1 : 0 : -1)\} \\ \mathfrak{R}' &:= \{(1 : 1 : 1), (0 : 1 : 1), (1 : 0 : 1); (2 : 2 : 3)\} \end{aligned}$$

Si queremos calcular las coordenadas homogéneas del punto $(2 : 2 : 2)$ respecto de \mathfrak{R} y \mathfrak{R}' deberemos tener en cuenta un par de cosas. La primera, es que las coordenadas homogéneas de todos los puntos escritos hasta ahora hace referencia a la base canónica de \mathbb{R}^3 .

Por ende, basta con calcular la matriz de cambio de base de la base canónica a las bases asociadas por \mathfrak{R} y \mathfrak{R}' , lo cual es algo facilísimo (una vez obtenidas sendas bases).

Como la obtención de las mismas no es el objetivo de esta sección, las presentamos directamente:

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_{\mathfrak{R}} &= \{(2, 0, -1), (1, -1, 0), (-1, 1, -1)\} \\ \mathcal{B}_{\mathfrak{R}'} &= \{(1, 1, 1), (0, 1, 1), (1, 0, 1)\} \end{aligned}$$

Por lo tanto las matrices de cambio de base serán:

$$\begin{aligned} P_{\mathfrak{R}} &= \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \rightsquigarrow P_{\mathfrak{R}}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{3}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 \end{pmatrix} \\ P_{\mathfrak{R}'} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightsquigarrow P_{\mathfrak{R}'}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Aplicando las ecuaciones del cambio de base:

$$\begin{aligned}(\alpha, \beta, \gamma)_{\mathcal{B}_{\mathfrak{R}}} &\equiv P_{\mathfrak{R}}^{-1} \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}^t \equiv (2, -6, -4)_{\mathcal{B}_{\mathfrak{R}}} \\(\alpha', \beta', \gamma')_{\mathcal{B}_{\mathfrak{R}'}} &\equiv P_{\mathfrak{R}'}^{-1} \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}^t \equiv (2, 0, 0)_{\mathcal{B}_{\mathfrak{R}'}}\end{aligned}$$

Así pues el punto $(2 : 2 : 2)$ escrito en la referencia cuya base asociada es la canónica (o un múltiplo suyo) se escribe, salvo múltiplos, como $(2 : -6 : -4)$ en base a la referencia \mathfrak{R} y como $(2 : 0 : 0)$ en base a la referencia \mathfrak{R}' .

Esto suele escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}x = (2 : 2 : 2) &= \rho(2 : -6 : -4)_{\mathfrak{R}} \quad \forall \rho \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \\x = (2 : 2 : 2) &= \rho(2 : 0 : 0)_{\mathfrak{R}'} \quad \forall \rho \in \mathbb{R} \setminus \{0\}\end{aligned}$$

Por ende, podemos escoger representaciones más o menos bonitas para nuestro punto dividiendo nuestras coordenadas homogéneas por el escalar no nulo que nos convenga. En ese caso:

$$\begin{aligned}x &= (1 : -3 : -2)_{\mathfrak{R}} \\x &= (1 : 0 : 0)_{\mathfrak{R}'}\end{aligned}$$

Esta última representación de x en la referencia \mathfrak{R}' da que pensar, pues tiene aspecto de vector de la base canónica.

En efecto, cuando trabajábamos con espacios vectoriales sabíamos que las coordenadas en cierta base \mathcal{B} del i -ésimo vector de \mathcal{B} eran las correspondientes al i -ésimo vector de la base canónica.

En el contexto proyectivo esto sigue siendo cierto, basta darse cuenta de que x es en realidad el primer punto de la referencia \mathfrak{R} , por lo que admite una representación tan agradable. Este hecho, cuya comprobación se deja al lector, es de gran utilidad, por lo que será empleado sin previo aviso a lo largo del texto. \diamond

1.6. Problemas

Problema 1.1. ¿Cuál es el menor número de variedades proyectivas de dimensión 3 necesarias para generar una de dimensión 11? ¿Y para generar una de dimensión 8?

Problema 1.2. Sea $\mathfrak{R} := \{a_0, a_1, a_2, a_3\}$ una referencia proyectiva de \mathbb{P}^2 . Calcular la matriz de cambio de referencia entre dos reordenaciones cualesquiera de \mathfrak{R} .

Capítulo 2

Dualidad

El objetivo de capítulo es enunciar y justificar el llamado *principio de dualidad*, tanto para espacios vectoriales como para espacios proyectivos.

No debe alarmarse el lector al que no le quedaron claros los conceptos referentes al espacio dual en un primer curso de álgebra lineal, ya que la mayoría se vuelve a explicar aquí con todo detalle.

Además, hemos evitado de uno de los conceptos que suele quedar menos claro, las “bases duales”. No obstante, este es necesario para la demostración de algunos resultados complementarios incluidos en el apéndice A, donde se revisitan las bases duales.

2.1. Dualidad en espacios vectoriales

Sea E un espacio vectorial de dimensión finita. Llamábamos *espacio dual* asociado a E al conjunto de todas las aplicaciones lineales (homomorfismos de espacios vectoriales) que nacen en E y mueren en \mathbb{K} . A estas aplicaciones lineales las denominamos *formas lineales* o *1-formas*.

Al espacio dual asociado a E lo denotábamos por E^* . Expresado con una notación conjuntista:

$$E^* \stackrel{\text{def.}}{=} \{ \alpha : E \rightarrow \mathbb{K} \mid \alpha \text{ es lineal} \} = \text{Hom}(E, \mathbb{K}) \quad (2.1)$$

Recordamos sin detenernos que el la palabra *espacio* no le queda grande al conjunto E^* ya que es un espacio vectorial, siendo su dimensión la dimensión de E .

2.1.1. Formas Lineales e Hiperplanos

En esta sección iniciaremos la construcción del puente entre un espacio vectorial y su dual, tratando de “unir” las variedades más notables de un espacio vectorial, los hiperplanos, con otras variedades de su dual.

Antes de comenzar, fijemos una base \mathcal{B} de E . Asimismo fijamos la base $\{1\}$ de \mathbb{K} .

Es claro que una forma lineal $h \in E^*$, tiene por matriz asociada cierta matriz $1 \times n$ (respecto de las base \mathcal{B} y $\{1\}$), a esta matriz la denotaremos simplemente M .

Como ya sabemos, para cada vector $u \in E$, el valor $h(u)$ viene dado por:

$$h(u) = MX \quad (2.2)$$

Siendo X la matriz columna compuesta por las coordenadas de u en la base \mathcal{B} . Es decir, la expresión anterior (2.2) no es más que el producto de una matriz fila por una matriz columna, desarrollémoslo:

$$h(u) = (h(e_1) \quad \cdots \quad h(e_n)) \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} = h(e_1)u_1 + \cdots + h(e_n)u_n \quad (2.3)$$

Como sabemos (es una comprobación inmediata), el kernel, o núcleo, de una aplicación lineal cualquiera, es un subespacio vectorial del espacio de donde nace.

Refrescamos asimismo la fórmula de las dimensiones para aplicaciones lineales, que nos será de utilidad en el futuro inmediato:

$$\dim(\ker(h)) + \dim(\operatorname{im}(h)) = \dim(E) \quad (2.4)$$

Nótese que en el contexto de las formas lineales, gracias a la fórmula de las dimensiones (2.4), los posibles valores de $\dim(\operatorname{im}(h))$ (a veces denominado *rango* de h) son 0 y 1.

En el primer caso, estaríamos ante la aplicación lineal idénticamente nula. En caso contrario, la dimensión del kernel de h (a veces denominada *nulidad* de h) sería $n - 1$. Es decir, el núcleo de la forma lineal h es un hiperplano de E .

Esto significa que $\ker(h)$ podrá ser representado mediante una única *ecuación cartesiana*, ya que $\operatorname{codim}(\ker(h)) = 1$.

La ecuación cartesiana del núcleo de una forma lineal salta a la vista, ya que se extrae de su propia definición. No es otra que:

$$h(e_1)u_1 + \cdots + h(e_n)u_n = 0 \quad (2.5)$$

Esto es evidente ya que esa es la definición del núcleo de h . El conjunto de aquellos vectores que, pasados por h , se anulan.

Acabamos de probar que el núcleo de toda forma lineal no nula es un hiperplano de E . Es decir, hemos construido un puente entre un espacio vectorial y su dual, identificando cada elemento del dual con un hiperplano de espacio original.

Sin embargo es un puente un tanto quebradizo, ya que solo podemos cruzarlo en una dirección (del dual al original), y, además, es posible que varios elementos del dual queden asociados al mismo hiperplano.

Para afianzar mejor este puente, veamos en primer lugar que podemos cruzarlo en el otro sentido, es decir, que todo hiperplano está asociado “vía núcleos” a un elemento del dual.

En términos de aplicaciones:

Lema 2.1.1 (Pseudolema de la Correspondencia). *La aplicación:*

$$\begin{aligned} E^* &\rightarrow \mathcal{H} \\ h &\mapsto \ker(h) \end{aligned}$$

es sobreyectiva.

\mathcal{H} denota el conjunto de los hiperplanos de E .

Demostración. Dado un hiperplano H , obtenemos una ecuación cartesiana que lo describa:

$$\alpha_1 x_1 + \cdots + \alpha_n x_n = 0$$

Donde los α_i representan escalares y los x_i componentes de un vector respecto de la base \mathcal{B} .

Sabiendo por (2.5) que la ecuación cartesiana del núcleo de una forma lineal es de la forma:

$$h(e_1)x_1 + \cdots + h(e_n)x_n = 0$$

Podemos construir la forma lineal asociada al hiperplano H de forma explícita. Basta definir h como la forma lineal que manda el i -ésimo vector de la base \mathcal{B} al escalar α_i . Es decir, la forma lineal con matriz asociada:

$$(\alpha_1 \quad \cdots \quad \alpha_n)$$

■

Con el lema 2.1.1 hemos avanzado un paso más en la construcción del puente entre un espacio y su dual, pudiendo ir del uno al otro y del otro al uno. Sin embargo, todavía queda un problema pendiente. El elemento del dual asociado a un hiperplano no es único (ni mucho menos).

Dado un hiperplano H existen infinitud de formas lineales cuyo núcleo es H . Esto es debido a que toda ecuación lineal equivalente a la ecuación cartesiana del hiperplano es también una ecuación cartesiana del hiperplano, a partir de la cual se construye (lema 2.1.1) una forma lineal asociada a H distinta de la primera.

Por ende, ahora nos interesa encontrar relaciones entre las formas lineales con idéntico núcleo, para así agruparlas y conseguir una biyección.

Lema 2.1.2 (Lema de la Correspondencia). *Todas las formas lineales asociadas a un mismo hiperplano H son múltiplos entre sí. En términos de aplicaciones:*

$$\begin{aligned}\mathbb{P}(E^*) &\rightarrow \mathcal{H} \\ [h] &\mapsto \ker(h)\end{aligned}$$

es biyectiva. Dicho de otra forma, los hiperplanos de un espacio vectorial se indentifican con las rectas de su dual.

Demostración. Sean dos ecuaciones cartesianas de H :

$$H \equiv \alpha_1 x_1 + \cdots + \alpha_n x_n = 0 \quad (2.6)$$

$$H \equiv \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_n x_n = 0 \quad (2.7)$$

Estas ecuaciones serán equivalentes, es decir, tendrán el mismo conjunto de soluciones (el hiperplano H). Por ende (proposición A.3.3) serán múltiplos entre sí, es decir:

$$\beta_i = \lambda \alpha_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (2.8)$$

Aplicando el método de construcción (lema 2.1.1) de formas lineales asociadas a H respecto de ambas ecuaciones cartesianas se obtienen:

$$f \equiv (\alpha_1 \quad \cdots \quad \alpha_n) \quad (2.9)$$

$$g \equiv \lambda (\alpha_1 \quad \cdots \quad \alpha_n) \quad (2.10)$$

Es decir $f = \lambda g$, o lo que es lo mismo $g \in [f]$. Esto prueba la inyectividad que queríamos, ya que la sobreyectividad se probó en el lema 2.1.1. ■

Este último resultado pone fin a la construcción del puente entre un espacio y su dual. Resumiendo, un hiperplano queda asociado, “vía núcleos” a una única recta su dual. Asimismo, cada recta del dual tiene asociada un hiperplano del espacio “primal”.

2.1.2. Dualidad Canónica

En esta sección tratamos de generalizar lo dicho en el caso anterior. Es decir, trataremos de identificar variedades lineales arbitrarias con variedades lineales del dual correspondiente.

Antes de comenzar consideramos fijadas las bases \mathcal{B} de E y $\{1\}$ de \mathbb{K} , como en la sección anterior.

En el caso de los hiperplanos, los identificábamos con el conjunto de las formas lineales cuyo núcleo era dicho hiperplano. Dicho de otra forma, el conjunto de las aplicaciones lineales que anulaban todos los vectores del hiperplano.

Siguiendo esta idea, probaremos a identificar una variedad lineal arbitraria con el conjunto de aplicaciones que anulan dicha variedad. Dicho conjunto es, si recordamos, nuestro viejo amigo el *anulador* de dicha variedad.

Definición 2.1.1 (Anulador de un subespacio vectorial). Sea $W \subset E$ subespacio vectorial de E . Se define el *anulador* de W , al que denotaremos por W^\perp , como el conjunto formado por las 1-formas que anulan todos los vectores de W . Es decir:

$$W^\perp := \{\alpha \in E^* \mid \alpha(u) = 0 \quad \forall u \in W\} = \{\alpha \in E^* \mid W \subset \ker(\alpha)\} \quad (2.11)$$

Inmeditamente se comprueba que el anulador de un subespacio vectorial es un subespacio vectorial del dual asociado.

Observación 2.1.1 (Generalización de la Noción de Anulador). Se puede, generalizar la definición de anulador, no solo para subespacios sino también para subconjuntos arbitrarios de un espacio vectorial. La conveniencia de esta generalización viene dada porque desbloquea algunos resultados técnicos de gran utilidad. Como la importancia de esto aquí es muy reducida, tanto la generalización de la definición 2.1.1 como los resultados más elementales se han trasladado al apéndice. En concreto a la definición A.3.2 y al lema A.3.2. ◇

Intentemos reeditar el lema de la correspondencia 2.1.2 del apartado anterior, tratando de identificar a cada subespacio de E con su anulador correspondiente.

Lema 2.1.3 (Lema de la Correspondencia). *Los subespacios de E están en biyección con los subespacios de E^* de la siguiente manera:*

$$\begin{aligned} \mathcal{U} &\xrightarrow{\Phi} \mathcal{U}^* \\ U &\mapsto U^\perp \end{aligned}$$

Donde \mathcal{U} y \mathcal{U}^* denotan el conjunto de los subespacios de E y E^* respectivamente. Dicho de otra forma, cada subespacio puede identificarse con su anulador.

Demostración. Para la sobreyectividad veamos que todo subespacio W de dimensión r de E^* es el anulador de un cierto subespacio U .

Para esto, trataremos de probar que el conjunto de vectores de E que son anulados por todas las formas lineales de W (imagen inversa de Φ) es un subespacio vectorial de E . A este conjunto le denominaremos *antianulador* o *anulador dual*. Este nombre se debe a que el anulador de dicho conjunto (por definición) es W .

Notamos que W admitirá una cierta base compuesta de r formas lineales. Esto tiene importancia, ya que, cada vector que sea anulado por todas las formas lineales de la base, también lo será, por linealidad, por todas las aplicaciones de W .

Dicho lo cual, tenemos que:

$$W = \mathcal{L}(f_1, \dots, f_r)$$

Dichas formas lineales tendrán ciertas matrices asociadas:

$$f_i \equiv (a_1^i \quad \dots \quad a_n^i)$$

Dado un vector $x = (x_1, \dots, x_n)_{\mathcal{B}}$, su valor por f_i viene dado por la ecuación (2.3):

$$f_i(x) = a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n$$

Así, pues el conjunto de los vectores tales que son anulados por las formas lineales de W (antianulador) es el conjunto de vectores que cumplen las ecuaciones:

$$\begin{cases} a_1^1 x_1 + \dots + a_n^1 x_n &= 0 \\ &\vdots \\ a_1^r x_1 + \dots + a_n^r x_n &= 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Estas ecuaciones pueden interpretarse por las ecuaciones cartesianas de cierto subespacio U de dimensión $n - r$ cuyo anulador es precisamente W .

Esto también prueba la inyectividad, ya que hemos visto que la imagen inversa de Φ es un único subespacio. ■

Observación 2.1.2 (Dimensiones de los Dualizados). Obsérvese que hemos probado algo bastante importante (además de lo queríamos probar en un principio), y es que, las dimensiones de un subespacio y su anulador suman la dimensión del espacio total, es decir:

$$\dim(U) + \dim(U^\perp) = \dim(E) \quad (2.13)$$

Dicho de otra forma, un subespacio U de dimensión r “dualiza” en un subespacio U^\perp de dimensión $n - r$ (su codimensión). ◇

Recapitulando, hemos conseguido construir un puente “sólido” y “de ida y vuelta” entre las variedades de un espacio vectorial y las de su dual “vía anuladores” y “vía antianuladores” respectivamente.

Para el lector que haya optado por omitir la demostración del lema 2.1.3 el término “antianulador” resultará extraño. Definémoslo aparte:

Definición 2.1.2 (Antianulador). Sea un subespacio W del dual E^* , se define su *antianulador* como el conjunto de los vectores que son anulados por todos los elementos de W . Expresado de forma conjuntista:

$$W^\top := \{u \in E \mid \alpha(u) = 0 \ \forall \alpha \in W\}$$

Es claro que esto no es más que la imagen inversa de la aplicación del lema 2.1.3, que asigna a cada subespacio de E su anulador correspondiente. Como ese mismo lema demuestra que tal aplicación es biyectiva es trivial deducir que:

$$(W^\perp)^\top = W \quad (2.14)$$

Observación 2.1.3 (Abusos de Notación Habituales). Algunos textos (y docentes) denotan al antianulador de la misma forma que lo hacen con el anulador. Además, para dar verosimilitud a este abuso de notación, definen el anulador de un subespacio de E^* como lo que nosotros conocemos como antianulador. Dicho abuso de notación les permite hacer afirmaciones como:

$$(W^\perp)^\perp = W$$

Lo cual, a priori, con nuestra notación, es una trola bastante grande.

Sin embargo, trabajando con cuidado, podemos demostrar que, efectivamente, con nuestras notaciones se cumple que el operador anulador es “esencialmente involutivo”. Es decir:

$$(W^\perp)^\perp \cong W \quad (2.15)$$

Esto significa que existe un isomorfismo entre el anulador del anulador un subespacio (un subespacio del dual del dual) y el subespacio en sí. No solo eso, se puede demostrar que dicho isomorfismo es especialmente agradable, por lo que se le da el nombre de *canónico*.

Como la prueba de este hecho no pinta mucho aquí, se ha trasladado al apéndice A. \diamond

Veamos a continuación una serie de propiedades que nos serán de gran ayuda cuando conozcamos el llamado “principio de dualidad”, en la sección 2.1.3. Estas propiedades pueden resumirse en dos; la inversión de las contenciones y las leyes de DeMorgan.

Proposición 2.1.4 (Propiedades del Anulador). *Se cumplen las siguientes propiedades:*

1. *Los contenidos se invierten al dualizar. Es decir:*

$$W \subset U \Leftrightarrow U^\perp \subset W^\perp$$

2. *Las sumas se convierten en intersecciones al dualizar:*

$$(U + W)^\perp = U^\perp \cap W^\perp$$

3. *Las intersecciones se convierten en sumas:*

$$(U \cap W)^\perp = U^\perp + W^\perp$$

Demostración. 1. $\boxed{\Rightarrow}$ Dado un $\alpha \in U^\perp$, veamos que $\alpha \in W^\perp$. En efecto, $\alpha(u) = 0$ para todo $u \in U$, pero como $W \subset U$ se tiene que $\alpha(w) = 0$ para todo $w \in W$, luego $\alpha \in W^\perp$.

$\boxed{\Leftarrow}$ Sea $w \in W$, veamos que $w \in U$. Es claro que $\alpha(w) = 0$ para toda $\alpha \in W^\perp$. Como $U^\perp \subset W^\perp$ se tiene que $\beta(w) = 0$ para toda $\beta \in U^\perp$. Luego w pertenece al antianulador del anulador de U . Por la ecuación (2.14) se tiene que $w \in (U^\perp)^\top = U$.

2. Sea $\alpha \in (U + W)^\perp$, inmediatamente se desprende que $\alpha(u + w) = \alpha(u) + \alpha(w) = 0$ para todo $u \in U$ y todo $w \in W$. Como $u \in U + W$ y $w \in U + W$ tenemos que $\alpha(u) = 0$ para todo $u \in U$ y $\alpha(w) = 0$ para todo $w \in W$. Luego α pertenece a los anuladores de U y W simultáneamente. Es decir, $\alpha \in U^\perp \cap W^\perp$. Como todos los pasos que hemos hecho son equivalencias, el resultado se sigue.

3. Dado $\alpha \in U^\perp + W^\perp$, veamos que $\alpha \in (U \cap W)^\perp$. Usando que $\alpha \in U^\perp + W^\perp$ tenemos que $\alpha = \beta + \gamma$ donde $\beta \in U^\perp$ y $\gamma \in W^\perp$. Para probar que pertenece al anulador de la intersección, tomemos un $\xi \in U \cap W$ arbitrario y veamos que α lo anula. En efecto:

$$\alpha(\xi) = (\beta + \gamma)(\xi) = \beta(\xi) + \gamma(\xi) = 0$$

Acabamos de ver que $U^\perp + W^\perp \subset (U \cap W)^\perp$. Para ver la igualdad, veamos que ambos tienen la misma dimensión. Para ello usaremos la fórmula de Grassmann, el apartado anterior de esta demostración y la observación 2.1.2:

$$\begin{aligned} \dim(U^\perp + W^\perp) &= \dim(U^\perp) + \dim(W^\perp) - \dim(U^\perp \cap W^\perp) = \\ &= \dim(U^\perp) + \dim(W^\perp) - \dim((U + W)^\perp) = \\ &= n - (\dim(U) + \dim(W) - \dim(U + W)) = \\ &= n - (\dim(U \cap W)) = \\ &= \dim((U \cap W)^\perp) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Con lo que concluye la demostración. ■

A la identificación de un subespacio con su anulador se la denomina *dualidad canónica*.

2.1.3. Principio de Dualidad

Estamos en disposición de enunciar el llamado *principio de dualidad*, un resultado de extrema importancia, ya que, por cada teorema que demos demos obtendremos otro sin necesidad de demostrarlo. A continuación trataremos de enunciar y justificar este principio de forma natural, con un ejemplo. Presentamos los siguientes enunciados:

Teorema 2.1.5. *Sea un espacio vectorial de dimensión 3 entonces:*

Dos rectas distintas generan un plano.

Teorema 2.1.6. *Sea un espacio vectorial de dimensión 3 entonces:*

Dos planos distintos se cortan en una recta.

A simple vista los teoremas 2.1.5 y 2.1.6 parecen dos teoremas totalmente independientes de tal forma que cada cual requerirá una prueba.

Bien, tratemos de demostrar el teorema 2.1.5. (Recomendamos encarecidamente al lector no omitir la siguiente demostración).

Demostración del Teorema 2.1.5. Nos preguntamos si la suma de dos subespacios de dimensión uno cuya intersección es un espacio de dimensión nula tendrá dimensión 2. Es decir:

$$\dim(U + W) \stackrel{?}{=} 2$$

Como por la observación 2.1.2 preguntarse por la dimensión de un subespacio es preguntarse por la dimensión de su anulador obtenemos que nuestra pregunta inicial es equivalente a:

$$\dim((U + W)^\perp) \stackrel{?}{=} 3 - 2 = 1$$

Asimismo, por la proposición 2.1.4 sabemos que el anulador de una suma es la intersección de anuladores, luego esta segunda pregunta es equivalente a:

$$\dim((U^\perp \cap W^\perp)) \stackrel{?}{=} 1$$

Donde, por la observación 2.1.2 tenemos que $\dim(U^\perp) = \dim(W^\perp) = 2$.

Además, como $\dim(U \cap W) = 0$, se tiene que $\dim(U^\perp + W^\perp) = 3$.

Así, a partir de nuestra primera pregunta, hemos obtenido una equivalente que reza:

¿En un espacio de dimensión 3, dos planos distintos se cortan en una recta?

Y esta es, precisamente la pregunta que deberíamos hacernos si estuviéramos tratando de demostrar el teorema 2.1.6.

Con esto hemos demostrado que los teoremas 2.1.5 y 2.1.6 son equivalentes. Es decir, si uno es cierto, es cierto el otro (y viceversa). Asimismo, si uno es falso, el otro también lo será (y al revés). Por ende, con probar uno de los dos nos valdrá.

En lo que respecta a la prueba del teorema, es un cálculo inmediato con la fórmula de Grassmann y se deja como ejercicio de cálculo mental al lector. ■

Quizá este no sea el mejor ejemplo para apreciar la gran utilidad de este principio, ya que, las demostraciones de ambos teoremas son extraordinariamente sencillas. Sin embargo, pueden darse casos (y se derán a lo largo del texto) en los que la demostración de un teorema sea extraordinariamente sencilla en el caso dual y algo más engorrosa en el caso “normal”.

Así pues, dado cierto aserto sobre espacios vectoriales compuesto en términos de sumas, intersecciones y contenidos puede traducirse a un *aserto dual* equivalente gracias a las propiedades demostradas en la sección anterior.

Esto es una auténtica fábrica de teoremas, ya que, si demostramos la veracidad de un enunciado, obtendremos automáticamente la veracidad de su aserto dual equivalente.

2.2. Dualidad en espacios proyectivos

Una vez repasados y ampliados los conceptos de dualidad en espacios lineales, pasemos a introducir la dualidad en espacios proyectivos. Como siempre, iremos trasladando al contexto proyectivo los resultados del mundo lineal.

Definición 2.2.1 (Espacio Proyectivo Dual). Dado un espacio vectorial E , se llama *espacio proyectivo dual* de E al espacio proyectivo asociado al espacio vectorial dual E^* .

Lo denotaremos, de forma natural, por $\mathbb{P}(E^*)$.

Observación 2.2.1 (Dimensión del Espacio Proyectivo Dual). Dado que (si la dimensión es finita) el espacio dual E^* tiene la misma dimensión que E , deducimos inmediatamente que la dimensión del espacio proyectivo es la misma que la del espacio proyectivo dual. Es decir:

$$\dim(\mathbb{P}(E)) = \dim(\mathbb{P}(E^*)) \quad (2.17)$$

◇

2.2.1. Formas Lineales e Hiperplanos Proyectivos

Comenzamos este apartado recordando brevemente que un hiperplano vectorial no es otra cosa que un subespacio lineal de codimensión 1. Asimismo, un hiperplano proyectivo H no es más que el espacio proyectivo asociado a cierto hiperplano vectorial \hat{H} . Es trivial observar que la dimensión de un hiperplano proyectivo es $\dim(\mathbb{P}(E)) - 1$. Luego son variedades de codimensión 1 respecto de la dimensión del espacio proyectivo total.

Recordemos importante resultado obtenido en el lema 2.1.2, que afirma que todo hiperplano vectorial \hat{H} está en biyección con las formas lineales cuyo núcleo es el propio \hat{H} , las cuales conforman un rayo de E^* . Es decir, todo hiperplano está en biyección con un punto del espacio proyectivo dual.

Tratamos ahora de fabricarnos un puente entre los hiperplanos proyectivos y alguna variedad del espacio proyectivo dual, a imagen y semejanza de lo hecho en secciones anteriores.

Surge así el siguiente lema, casi idéntico al lema 2.1.2.

Lema 2.2.1 (Lema de la Correspondencia Proyectiva). *La aplicación $\psi = \pi \circ \varphi$ es biyectiva.*

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{H} & \xrightarrow{\pi^{-1}} & \hat{\mathcal{H}} \\ & \searrow \varphi \equiv \Phi \circ \pi^{-1} & \downarrow \Phi \equiv \hat{H}^\perp \\ & & E^* \xrightarrow{\pi} \mathbb{P}(E^*) \end{array}$$

Aclarando la notación, \mathcal{H} denota el conjunto de los hiperplanos proyectivos de $\mathbb{P}(E)$, π^{-1} representa la imagen inversa de la proyección canónica y Φ es la dualidad canónica.

Demostración. El conjunto de los hiperplanos proyectivos de $\mathbb{P}(E)$ está en biyección vía π^{-1} con el conjunto de los hiperplanos vectoriales de E (observación 1.2.1).

A su vez, por el lema 2.1.2, los hiperplanos vectoriales están en biyección con las rectas del espacio dual vía dualidad canónica.

Asimismo, las rectas del dual están en biyección con los puntos del espacio proyectivo dual vía proyección canónica π .

Dado que la composición de biyecciones es biyección, queda demostrado que los hiperplanos proyectivos están en biyección con los puntos del espacio proyectivo dual. ■

Entonces, dado un hiperplano proyectivo H , podemos escribirlo de la forma:

$$H = \mathbb{P}(\hat{H}) = \{[u] \in \mathbb{P}(E) \mid h(u) = 0\} \quad (2.18)$$

2.2.2. Dualidad Canónica

Hemos conseguido identificar los hiperplanos proyectivos con puntos del espacio proyectivo dual. Al igual que hicimos en la sección anterior, tratemos ahora de generalizar ese resultado para variedades proyectivas arbitrarias.

Recordemos que, dada una variedad lineal, esta estaba en biyección con su anulador, el cual es una variedad lineal de E^* . Trasladando de forma natural esta idea al contexto proyectivo obtenemos el siguiente resultado.

Lema 2.2.2 (Lema de la Correspondencia Proyectiva). *La aplicación $\psi = \pi \circ \varphi$ es biyectiva.*

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{V} & \xrightarrow{\pi^{-1}} & \widehat{\mathcal{V}} \\ & \searrow \varphi \equiv \Phi \circ \pi^{-1} & \downarrow \widehat{\mathcal{V}}^\perp \equiv \Phi \\ & & \widehat{\mathcal{V}}^* & \xrightarrow{\pi} & \mathcal{V}^* \end{array}$$

Aclarando la notación, los conjuntos \mathcal{V} , $\widehat{\mathcal{V}}$, $\widehat{\mathcal{V}}^*$ y \mathcal{V}^* denotan el conjunto de las variedades de $\mathbb{P}(E)$, E , E^* y $\mathbb{P}(E^*)$ respectivamente.

Así, dada una variedad proyectiva \mathcal{X} , se corresponde su dualizada $X^* = \psi(X) = \mathbb{P}(\widehat{X}^\perp)$

Demostración. Es idéntica a la del lema 2.2.1. ■

Obsérvese que, lo que estamos haciendo, no es otra cosa que identificar cada variedad proyectiva $X = \mathbb{P}(\widehat{X})$ con el proyectivizado del anulador de \widehat{X} .

Observación 2.2.2 (Caso Particular de los Hiperplanos). Veamos, a modo de aclaración suplementaria, que el lema 2.2.2 funciona también (por supuesto), para hiperplanos.

$$H^* = \mathbb{P}(\widehat{H}^\perp) = \mathbb{P}(\{h \in E^* \mid h(u) = 0 \ \forall u \in \widehat{H}\}) = [h]$$

◇

Las propiedades que se desprendían del lema 2.1.2 pueden extenderse sin esfuerzo al contexto proyectivo, tal y como muestra la siguiente proposición.

Proposición 2.2.3 (Propiedades de la Dualidad Proyectiva). *Sean E un espacio vectorial y su correspondiente espacio proyectivo $\mathbb{P}(E)$. Sean $X, Y \subset \mathbb{P}(E)$ variedades proyectivas. Se cumple:*

1. $X \subset Y \Leftrightarrow Y^* \subset X^*$
2. $(X \cap Y)^* = \mathcal{V}(X^*, Y^*)$
3. $\mathcal{V}(X, Y)^* = X^* \cap Y^*$

$$4. \dim(X) + \dim(X^*) = \dim(\mathbb{P}(E)) - 1$$

Demostración. 1. Si $X \subset Y$, entonces $\hat{X} \subset \hat{Y}$. Por la proposición 2.1.4 tenemos que $\hat{Y}^\perp \subset \hat{X}^\perp$, y por tanto $Y^* \subset X^*$. Recíprocamente, basta leer la demostración al revés.

2. Por el lema 1.2.2 se tiene que $X \cap Y = \mathbb{P}(\hat{X} \cap \hat{Y})$. Por tanto $(X \cap Y)^* = \mathbb{P}((\hat{X} \cap \hat{Y})^\perp)$. Aplicando la proposición 2.1.4 se tiene que $\mathbb{P}((\hat{X} \cap \hat{Y})^\perp) = \mathbb{P}(\hat{X}^\perp + \hat{Y}^\perp) = \mathcal{V}(X^*, Y^*)$.

3. Se tiene que $\mathcal{V}(X, Y) = \hat{X} + \hat{Y}$. Por tanto $\mathcal{V}(X, Y)^* = \mathbb{P}((\hat{X} + \hat{Y})^\perp)$. Por la proposición 2.1.4 sabemos que $\mathbb{P}((\hat{X} + \hat{Y})^\perp) = \mathbb{P}(\hat{X}^\perp \cap \hat{Y}^\perp)$. Atendiendo de nuevo al lema 1.2.2 queda que $\mathbb{P}(\hat{X}^\perp \cap \hat{Y}^\perp) = \mathbb{P}(\hat{X}^\perp) \cap \mathbb{P}(\hat{Y}^\perp) = X^* \cap Y^*$.

4. Se tiene inmediatamente:

$$\dim(X) + \dim(X^*) = \dim(\hat{X}) - 1 + \dim(E) - \dim(\hat{X}) - 1 = \dim(\mathbb{P}(E)) - 1$$

■

Observación 2.2.3. El lema anterior reafirma, aún más si cabe, que el dualizado de un hiperplano proyectivo es un punto. En efecto supongamos que $\dim(E) = m + 1$, entonces:

$$\dim(X) + \dim(X^*) = m - 1$$

Como $\dim(X) = m - 1$, se sigue que $\dim(X^*) = 0$.

◇

2.2.3. Principio de Dualidad para espacios proyectivos

Llegados a este punto parece natural tratar de extrapolar el principio de dualidad presentado en la sección 2.1.3 al mundo proyectivo, ya que contamos con todos los ingredientes necesarios.

La proposición 2.2.3 es de vital importancia ya que, literamente, es una “fábrica de enunciados equivalentes”. Expliquemos esto.

Supongamos que nos preguntamos por la dimensión de cierta variedad proyectiva de un espacio proyectivo de dimensión n . La proposición 2.2.3 (en su cuarto apartado) afirma que decir que cierta variedad X tiene cierta dimensión r es equivalente a decir que su variedad dualizada X^* tendrá dimensión $n - 1 - r$.

Esto quiere decir que si una afirmación es cierta, la otra también lo será (y viceversa), cumpliéndose algo similar si alguna de las dos afirmaciones es falsa. Por ende, con demostrar o refutar una de las dos afirmaciones (la que nos resulta más sencilla), habremos refutado o demostrado la otra. Esta es la esencia del principio de dualidad, tener dos teoremas al precio de uno (el más barato).

El otro ámbito de aplicación del principio de dualidad es cuando nos preguntamos si cierta variedad X está contenida dentro de cierta otra variedad Y . En este caso, la proposición 2.2.3 (en su primer apartado) nos dice que afirmar que $X \subset Y$ es equivalente a afirmar que $Y^* \subset X^*$.

La combinación de estos dos ámbitos de aplicación, unidos a las propiedades auxiliares que nos ofrece la proposición 2.2.3 (en su segundo y tercer apartados) es lo que hace realmente útil y potente al principio de dualidad. Veamos algunos ejemplos.

Ejemplo 2.2.1 (Obtención del Enunciado Dual). Hallemos la proposición dual de “*en un plano proyectivo real toda recta contiene al menos tres puntos diferentes*”.

Como vemos, nos preguntamos si cierta variedad r (recta) contiene a cierta variedad p_i (punto). Es decir:

$$p_i \subset r$$

Esto es equivalente a preguntarse si el dualizado de r , al que llamaremos r^* está contenido en el dualizado de p_i .

$$r^* \subset p_i^*$$

Como r es una variedad de dimensión 1 en un espacio de dimensión 2, r^* será una variedad de dimensión 0 (un punto). Análogamente, al ser p_i un punto, p_i^* será una recta.

Así pues el enunciado dual (equivalente al primero) será “*Por todo punto pasan al menos 3 rectas diferentes*”.

Nótese que no hemos demostrado la veracidad ni la falsedad de ninguno de los enunciados, sin embargo, con demostrar algo sobre uno de ellos, este algo será automáticamente válido para el otro. \diamond

Todos estos puentes, identificaciones, y demás no serían de ninguna utilidad si no nos permitiesen resolver problemas mayor facilidad. Hasta ahora no hemos visto ningún ejemplo que realmente haga valer todo nuestro trabajo. Pues, al fin y al cabo, ¿no podemos simplemente resolver los problemas “a pelo”? Es posible, sí, pero muchas veces hacer la asociación entre una variedad proyectiva y su dual, es decir la proyección del anulador, facilita enormemente la resolución. Veamos a continuación el ejemplo prometido.

Ejemplo 2.2.2 (Resolución del Problema Dual). Sean dos rectas (variedades de dimensión 1) r_1, r_2 en el espacio proyectivo $\mathbb{P}^3 = \mathbb{P}(\mathbb{R}^4)$, las cuales no se cortan. Asimismo sea un punto $p \in \mathbb{P}^3$ no perteneciente a ninguna de las rectas. Demuestre que existe una única recta r que pasa por p y corta a ambas rectas r_1, r_2 .

Desbrozando la literatura del enunciado tenemos dos rectas r_1, r_2 y un punto $p \in \mathbb{P}^3$ tales que $r_1 \cap r_2 = \emptyset$ y $p \notin r_1 \cup r_2$. Debemos probar que existe una única recta r tal que $p \in r$, $r_1 \cap r \neq \emptyset$ y $r_2 \cap r \neq \emptyset$. Resolvamos el problema primero sin dualizar, y luego pasando al dual.

1. Tomemos la variedad proyectiva engendrada por r_1 y p , la cual es un plano ya que

$$\dim(\mathcal{V}(p, r_1)) = \dim(p) + \dim(r_1) - \dim(r_1 \cap p) = 0 + 1 - (-1) = 2$$

Podemos aplicar el corolario 1.3.2 al plano $\mathcal{V}(p, r_1)$ y la recta r_2 , según el cual una recta y un hiperplano siempre se cortan. Antes, y para obtener el resultado deseado, debemos asegurarnos de que $r_2 \not\subset \mathcal{V}(p, r_1)$, pues en caso contrario existirían más de un punto de corte entre la recta y el hiperplano y r no sería única. Es fácil comprobar que esto no ocurre, ya que si $r_2 \subset \mathcal{V}(p, r_1)$, entonces $r_1 \cap r_2 \neq \emptyset$, llegando así a un absurdo. Existirá por tanto un único punto $q \in r_2 \cap \mathcal{V}(p, r_1)$. Definimos entonces la recta r como la variedad engendrada por los puntos p y q , pudiéndose comprobar con la fórmula de las dimensiones que efectivamente es una recta. Nótese que r es única, ya que lo es el punto q . Además $r_1 \cap r \neq \emptyset$ y $r_2 \cap r \neq \emptyset$, ya que $q \in r_2 \cap \mathcal{V}(p, r_1)$. Queda así demostrado el ejercicio.

2. Para empezar, y atendiendo a la proposición 2.2.3, la ecuación de las dimensiones que caracteriza la dualización es, en nuestro caso:

$$\dim(X) + \dim(X^*) = 2.$$

Por tanto, el dual de un punto es un plano y el dual de una recta, otra recta. Tenemos entonces que p^* es un plano y r_1^*, r_2^* son rectas. Por otro lado que $p \in r$ implica, por la proposición 2.2.3, que $r^* \subset p^*$. De igual forma que $p \notin r_1 \cup r_2$ implica que $r_1^* \not\subset p^*$ y $r_2^* \not\subset p^*$. Además, se comprueba inmediatamente (dualizando y aplicando la fórmula de Grassmann) que como $r_1 \cap r_2 = \emptyset$, entonces $r_1^* \cap r_2^* = \emptyset$.

Por tanto el enunciado del problema se traduce en, dadas dos rectas $r_1^*, r_2^* \in \mathbb{P}^{3*}$ y un plano $p^* \in \mathbb{P}^{3*}$ tales que $r_1^* \cap r_2^* = \emptyset$, $r_1^* \not\subset p^*$ y $r_2^* \not\subset p^*$; demostrar que existe una única recta r^* tal que $r_1^* \cap r^* \neq \emptyset$, $r_2^* \cap r^* \neq \emptyset$ y $r^* \subset p^*$.

Dado que las rectas r_1^*, r_2^* no están contenidas en el plano p^* , cortarían con él en dos puntos únicos. Es claro que la recta engendrada por esos dos puntos es única y cumple las condiciones requeridas.

En este caso, la dualización del problema lo convierte en algo trivial de resolver. \diamond

Observación 2.2.4. Este enunciado es falso en el contexto de la geometría afín. Podemos encontrar dos rectas paralelas, r_1 y r_2 , y un punto p , que cumplan las hipótesis del enunciado, para los cuales no existe ninguna recta r ; o bien para los cuales existan infinitas rectas r , tales que $p \in r$, $r_1 \cap r \neq \emptyset$ y $r_2 \cap r \neq \emptyset$. Ello se debe a que en el espacio afín dos rectas paralelas no se cortan, mientras que en el espacio proyectivo sí. \diamond

Capítulo 3

Ecuaciones de Variedades Projectivas

Nuestra tarea aquí es tratar de, dado un una recta o un plano proyectivos, dar una referencia proyectiva de ese subespacio mediante la cual hacer una descripción explícita de sus elementos.

3.1. Rectas Projectivas

Anteriormente advertimos que llamaríamos “rectas” a los subespacios proyectivos de dimensión unitaria. Sin embargo, esta definición no nos es demasiado útil cuando lo que queremos es describir los elementos de dicho subespacio.

Es sencillos ver, usando la fórmula de Grassmann, que la variedad proyectiva engendada por dos puntos distintos es una recta. En efecto:

$$\dim(\mathcal{V}(p_1, p_2)) = \dim(p_1) + \dim(p_2) - \dim(p_1 \cap p_2) = 0 + 0 - (-1) = 1$$

Además, también se da el recíproco, ya que toda recta r se identifica canónicamente con un plano vectorial del espacio lineal subyacente, el cual estará generado por dos vectores u y v . Es claro por la ecuación (1.4) que los rayos $[u]$ y $[v]$ generan la recta r .

A partir de esta pequeña refexión inicial surge esta nueva definición equivalente de recta.

Definición 3.1.1 (Recta en $\mathbb{P}(E)$). Se define *recta proyectiva* que pasa por los puntos proyectivos P y Q como la variedad engendada por dichos puntos. A dicha recta se la denomina *recta* PQ .

3.1.1. Ecuaciones Paramétricas

Sean $P = [u]$ y $Q = [v]$ dos puntos proyectivos, vamos a describir los elementos de la recta PQ , que no es otra cosa que $\mathcal{V}(P, Q)$.

Para describir los elementos de esta variedad (o de cualquiera) deberemos dar una referencia en función de la cual *coordenar* todos los puntos de la misma.

Como P y Q son dos puntos proyectivos distintos, los vectores u, v son linealmente independientes, formando una base de la variedad lineal $\mathcal{L}(u, v)$.

Para construir una referencia bastaría tomar los puntos P, Q y añadirle como punto unidad un tercer punto de la recta cuyo representante pueda ser escrito como combinación lineal de u y v con todos los coeficientes no nulos, por ejemplo $[u + v]$ (compruébese).

De esta forma tenemos la referencia:

$$\mathfrak{R} = \{P, Q; [u + v]\}$$

Por el método de construcción de bases asociadas tenemos que la base asociada a esta referencia es $\mathcal{B} = \{u, v\}$. Como sabemos, todo punto $p \in \mathcal{V}(P, Q)$ es un rayo representado por un vector de $\mathcal{L}(u, v)$. Es decir, un vector $w = \alpha u + \beta v$ con alguno de los coeficientes no nulo.

Esto quiere decir que todo punto de la recta PQ es un rayo de la forma:

$$[\alpha u + \beta v] = (\alpha : \beta)_{\mathfrak{R}}$$

expresado en *coordenadas homogéneas* respecto de la referencia \mathfrak{R} . A esto se le llaman *ecuaciones paramétricas homogéneas* de la recta PQ . Veámoslo en un caso concreto.

Ejemplo 3.1.1 (Ecuaciones Paramétricas Homogéneas). Dados los puntos $P = (1 : 2 : -1)$ y $Q = (0 : 1 : 3)$ se nos pide dar unas ecuaciones paramétricas de la recta PQ .

Siguiendo los pasos expuestos, los rayos que conforman la recta PQ son de la forma:

$$[\alpha(1, 2, -1) + \beta(0, 1, 3)] \parallel \alpha, \beta \in \mathbb{K} \parallel (\alpha, \beta) \neq (0, 0)$$

Si expandimos un poco la expresión queda:

$$[(\alpha, 2\alpha + \beta, -\alpha + 3\beta)]$$

En otras palabras, la recta PQ son los rayos enegendrados por los vectores $w = (x_0, x_1, x_2)$ de manera que se cumple (matricialmente):

$$w \equiv \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \\ -1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

Recordamos brevemente que el conjunto de los vectores que cumplen la expresión matricial anterior forman un espacio subespacio vectorial. \diamond

Normalmente no se trabaja con estas ecuaciones paramétricas, en su lugar, se opta por “des-homogeneizarlas”, ya que por lo general es incómodo y antiintuitivo que los puntos de una recta queden descritos por dos parámetros. Es más, puede ocurrir que al dar valores a los parámetros obtengamos siempre el mismo punto.

Para solucionar este problema, escogemos un representante “estandar” de cada rayo dividiendo todo por α .

$$\left[u + \frac{\beta}{\alpha} v \right] \stackrel{\text{not.}}{=} [u + \theta v]$$

De esta forma, la recta ya no queda descrita por dos parámetros homogéneos α y β como antes, sino por un único parámetro θ a la que llamaremos *no homogéneo*.

Sin embargo, hemos de tener cuidado, pues, como más de uno ya se habrá dado cuenta, es posible que en algunos casos α se anule, por ende, θ quedaría indefinido. Como este caso se corresponde con un único punto (ya que los vectores de la forma βv representan el mismo rayo), y este es precisamente Q , diremos que una recta queda descrita por la siguiente *ecuación paramétrica no homogénea*:

$$PQ : \{[u + \theta v] \parallel \theta \in \mathbb{K}\} \cup \{Q\} \quad (3.1)$$

Como es una pena (y un estorbo) tener que indicar que añadimos el punto Q cada vez que queremos escribir la ecuación paramétrica de una recta, lo que hacemos es ampliar el rango de valores que puede tomar θ .

De esta forma, cuando $\alpha = 0$, definimos que θ toma como valor el símbolo ∞ . Por ende, el conjunto de valores que puede tomar θ queda ampliado, de forma que $\theta \in \mathbb{K} \cup \{\infty\} := \overline{\mathbb{K}}$, significando esto que, por definición, $[u + \infty v] = [v] = Q$. Describiremos pues la recta como:

$$PQ : \{[u + \theta v] \parallel \theta \in \overline{\mathbb{K}}\} \quad (3.2)$$

Dados los vectores $u = (u_0, u_1, \dots, u_n)$ y $v = (v_0, v_1, \dots, v_n)$ si los sustituimos en la ecuación (3.2) obtenemos:

$$\begin{aligned} PQ : \{[(u_0, u_1, \dots, u_n) + \theta(v_0, v_1, \dots, v_n)] \parallel \theta \in \overline{\mathbb{K}}\} = \\ = \{[(u_0 + \theta v_0, u_1 + \theta v_1, \dots, u_n + \theta v_n)] \parallel \theta \in \overline{\mathbb{K}}\} \end{aligned}$$

que se puede escribir a su vez como:

$$PQ : \{(u_0 + \theta v_0 : u_1 + \theta v_1 : \dots : u_n + \theta v_n) \parallel \theta \in \overline{\mathbb{K}}\} \quad (3.3)$$

denominada **ecuación paramétrica de la recta**, en coordenadas no homogéneas.

Ejemplo 3.1.2 (Parametrización de una Recta Concreta). Dados los puntos $P = (1 : 2 : -1)$ y $Q = (0 : 1 : 3)$ se nos pide parametrizar la recta PQ . Siguiendo los pasos expuestos en este apartado, la ecuación paramétrica de la recta PQ queda:

$$PQ : \{(1 : 2 + \theta : -1 + 3\theta) \mid \theta \in \mathbb{K}\}$$

donde, cuando $\theta = \infty$, nos referimos al punto $Q = (0 : 1 : 3)$. \diamond

3.1.2. Ecuación Implícita

Durante este apartado nos situaremos en el plano proyectivo \mathbb{P}^2 , donde las rectas son hiperplanos. Como ya sabemos, todo hiperplano proyectivo es proyección de un hiperplano vectorial. Por tanto, una recta de \mathbb{P}^2 es proyección de un plano de \mathbb{R}^3 .

Además, por ser hiperplano, este plano tiene una, y solo una, ecuación implícita (o cartesiana) que cumplen todos sus vectores. Por tanto, todos los representantes de los puntos de la recta proyectiva cumplen dicha ecuación, ya que son los vectores del plano o sus múltiplos.

De esta forma, asignamos a la recta de \mathbb{P}^2 la ecuación implícita del plano vectorial del que es proyección:

$$ax + by + cz = 0 \quad (3.4)$$

con a, b, c no todos nulos. Esta será la **ecuación implícita** de la recta, expresada en coordenadas homogéneas.

Veamos a continuación varias formas de obtener la ecuación implícita, en coordenadas homogéneas, de una recta proyectiva dados dos de sus puntos.

Sean $P = [u] = [(u_0, u_1, u_2)]$ y $Q = [v] = [(v_0, v_1, v_2)]$ dos puntos de \mathbb{P}^2 . La ecuación implícita de la recta PQ tendrá la forma

$$ax + by + cz = 0$$

donde a, b, c son coeficientes a determinar.

Dado que $P, Q \in PQ$, la primera forma de hallar esos coeficientes consiste simplemente en sustituir en x, y, z de la ecuación implícita las coordenadas de un vector representante de P y de uno de Q y resolver el sistema de ecuaciones resultante:

$$\begin{aligned} au_0 + bu_1 + cu_2 &= 0 \\ av_0 + bv_1 + cv_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Sin embargo, este método puede resultar un poco tedioso. Observemos que, aunque en el espacio proyectivo no está definido el producto escalar, la primera ecuación del sistema podría identificarse con el producto escalar usual entre el vector (a, b, c) y (u_0, u_1, u_2) . Al ser cero, esto implicaría que son perpendiculares. A partir de la segunda ecuación podemos deducir algo similar, que (a, b, c) es perpendicular al vector (v_0, v_1, v_2) .

De esta forma, el vector que debemos hallar es perpendicular a u y v . Por tanto, nos basta con hallar un vector perpendicular a ambos para determinar los coeficientes de la ecuación implícita, pues es única salvo múltiplos. Una forma rápida de hallar un vector (a, b, c) que cumpla esto es hacer el producto vectorial de u y v . Así los coeficientes serán el resultado de

$$(a, b, c) = u \times v = \begin{vmatrix} x & y & z \\ u_0 & u_1 & u_2 \\ v_0 & v_1 & v_2 \end{vmatrix} \quad (3.6)$$

por lo que la ecuación implícita de la recta vendrá dada por

$$(u \times v) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0 \quad (3.7)$$

3.1.3. Intersección de dos Rectas Projectivas

Una vez que sabemos describir una recta projectiva a través de sus ecuaciones, no está de más calcular la intersección de dos rectas. Para ello, nos situamos de nuevo en el plano projectivo \mathbb{P}^2 , debido a la facilidad con la que allí se opera, pero bien sería válido para cualquier espacio projectivo.

Sean pues dos rectas projectivas $r, r' \subset \mathbb{P}^2$. Al igual que con la ecuación implícita de la recta, quizás la primera ocurrencia para hallar la intersección de dos rectas sea combinar sus ecuaciones implícitas y resolver el sistema resultante

$$\begin{aligned} ax + by + cz &= 0 \\ a'x + b'y + c'z &= 0 \end{aligned}$$

donde a, b, c, a', b', c' son conocidos.

Sin embargo, este método no es del todo práctico. Si nos paramos a reflexionar un momento sobre qué debe cumplir la intersección, hallaremos formas mucho más fáciles de calcularla. Para empezar, la intersección de r y r' es un punto p del espacio projectivo. Esto se debe a que en \mathbb{P}^2 los hiperplanos son rectas, y por tanto, por el Corolario 1.3.2, la intersección de r y r' no puede ser vacía. Además, dicho punto pertenece tanto a r , como a r' . Por tanto, debe cumplir las ecuaciones de ambas rectas. Estas ecuaciones pueden ser tanto paramétricas como implícitas.

Si, por ejemplo, la recta r está descrita a través de su ecuación paramétrica, donde $[(u_0, u_1, u_2)]$ y $[(v_0, v_1, v_2)]$ son dos puntos de la recta:

$$r : \{(\theta u_0 + v_0 : \theta u_1 + v_1 : \theta u_2 + v_2) \mid \theta \in \mathbb{K}\}$$

existirá un valor de θ tal que

$$(\theta u_0 + v_0 : \theta u_1 + v_1 : \theta u_2 + v_2) = p \quad (3.8)$$

Una vez hallado ese valor (ahora veremos cómo), quedaría hallado el punto p , y con ello, la intersección de ambas rectas.

Si, por otro lado, la recta r' se describe a través de su ecuación implícita

$$a'x + b'y + c'z = 0$$

el punto p debe satisfacer dicha ecuación. Por tanto, podemos sustituir en la ecuación implícita de r' , en vez de las coordenadas de un representante arbitrario del punto p , las del vector $(\theta u_0 + v_0, \theta u_1 + v_1, \theta u_2 + v_2)$. Así, resolviendo la ecuación

$$a'(\theta u_0 + v_0) + b'(\theta u_1 + v_1) + c'(\theta u_2 + v_2) = 0$$

obtenemos el valor de θ que asegura que el punto p , descrito por la ecuación (3.8) pertenece a ambas rectas. Sustituyendo este valor en la ecuación (3.8) queda hallada la intersección de las rectas r y r' .

Veamos un ejempllo para asentar estos conceptos.

Ejemplo 3.1.3.

◇

Supongamos ahora que ambas rectas vienen descritas por su ecuación implícita. Al ser la intersección un punto $p = (p_0 : p_1 : p_2)$, podemos escoger un vector representante, por ejemplo (p_0, p_1, p_2) , y sustituirlo en ambas ecuaciones de tal forma que ambas deben cumplirse

$$\begin{aligned} ap_0 + bp_1 + cp_2 &= 0 \\ a'p_0 + b'p_1 + c'p_2 &= 0 \end{aligned}$$

donde p_0, p_1, p_2 son desconocidos.

Detengámonos un segundo y observemos la ecuación (3.5). ¿No se aprecia cierta similitud?. En efecto, en este caso el vector (p_0, p_1, p_2) hace el papel de (a, b, c) . Si hacemos la misma interpretación, aunque no del todo correcta, de perpendicularidad a través del producto escalar, podemos afirmar que el vector que buscamos es perpendicular a los vectores $\vec{a} = (a, b, c)$ y $\vec{a}' = (a', b', c')$. Al igual

que hicimos anteriormente, una forma rápida de hallar un vector perpendicular a otros dos, es hacer su producto vectorial. Por tanto, un vector representante del punto p viene dado por

$$(p_0, p_1, p_2) = \vec{a} \times \vec{a}' = \begin{vmatrix} x & y & z \\ a & b & c \\ a' & b' & c' \end{vmatrix}$$

Es decir, la intersección de las rectas r y r' es el punto

$$p = [(p_0, p_1, p_2)] = [\vec{a} \times \vec{a}'] \quad (3.9)$$

Es importante observar que para encontrar el punto de corte entre dos rectas de \mathbb{P}^2 se realiza la misma operación que para hallar los coeficientes de la ecuación implícita de la recta engendrada por dos puntos, correspondiente a la ecuación (3.6).

3.2. Planos Projectivos

Una vez completada la descripción de una recta, pasemos a realizar la de un plano de \mathbb{P}^3 . Este no es más que una variedad proyectiva de dimensión dos. Hallaremos sus ecuaciones paramétricas e implícitas generalizando los procedimientos del apartado anterior.

3.2.1. Ecuaciones paramétricas

Dados tres puntos proyectivos distintos $P = [u]$, $Q = [v]$ y $S = [s]$, vamos a describir los elementos del plano engendrado por ellos, es decir, los elementos de $\mathcal{V}(P, Q, S)$.

Para ello, y al igual que se hizo en el caso de la recta, debemos dar una referencia en función de la cual *coordinar* los puntos de la variedad. Dado que los tres puntos P, Q y S son distintos, los vectores u, v y s son linealmente independientes, por lo que forman una base de $\mathcal{L}(u, v, s)$.

Así, utilizando el mismo razonamiento que en el apartado 3.1.1, tomamos la referencia proyectiva dada por

$$\mathfrak{R} = \{P, Q, S; [u + v + s]\}$$

cuya base asociada es $\mathcal{B} = \{u, v, s\}$.

Todo punto p perteneciente al plano $\mathcal{V}(P, Q, S)$ es un rayo representado por un vector w de $\mathcal{L}(u, v, s)$. Por tanto, este vector puede ser escrito como $w = \alpha u + \beta v + \mu s$, con alguno de los coeficientes no nulo. Esto implica que los puntos del plano $\mathcal{V}(P, Q, S)$, expresados en coordenadas homogéneas, tienen la forma

$$[\alpha u + \beta v + \mu s] = (\alpha : \beta : \mu)$$

Al igual que en el caso de la recta proyectiva, podemos reducir la expresión del plano y reescribirlo en función de dos coordenadas no homogéneas θ y γ :

$$\left[u + \frac{\beta}{\alpha} v + \frac{\mu}{\alpha} s \right] \stackrel{\text{not.}}{=} [u + \theta v + \gamma s]$$

Sin embargo, en este caso, debemos tener más cuidado con los problemas que surgen cuando $\alpha = 0$.

Si $\alpha = 0$ y $\beta \neq 0 \neq \mu$, entonces estaremos haciendo referencia al punto $[v + s]$. En este caso diremos que $\theta = \infty = \gamma$. Por otro lado, si $\alpha = 0$ y $\beta = 0$, entonces el punto resultante se corresponde con S , y diremos que esto se da cuando $\gamma = \infty$. Asimismo, cuando $\theta = \infty$, estamos haciendo referencia al punto Q .

Teniendo en cuenta estas indeterminaciones, el plano $\mathcal{V}(P, Q, S)$ puede describirse a través de

$$\mathcal{V}(P, Q, S) : \{[u + \theta v + \gamma s] \parallel \theta, \gamma \in \mathbb{P}^1\} \quad (3.10)$$

siendo esta la **ecuación paramétrica del plano**, en coordenadas no homogéneas.

Observación 3.2.1. Este procedimiento para hallar las ecuaciones paramétricas de un plano de \mathbb{P}^3 no es más que una adaptación del procedimiento que se llevó a cabo en el apartado 3.1.1. Observemos que es un procedimiento fácilmente generalizable a cualquier variedad proyectiva, sea cual sea su dimensión y la del espacio proyectivo. Por tanto, no se explicará como hallar las ecuaciones paramétricas de una variedad proyectiva general, pues basta seguir los pasos del apartado 3.1.1, adaptándolo a las dimensiones de su caso. \diamond

3.2.2. Ecuación implícita

Dado que un plano en \mathbb{P}^3 es un hiperplano, al igual que ocurría con la recta en \mathbb{P}^2 y siguiendo el mismo razonamiento, le asignaremos la ecuación implícita del hiperplano de \mathbb{R}^4 del que es proyección

$$ax + by + cz + dt = 0 \quad (3.11)$$

con los coeficientes no todos nulos. Esta será la **ecuación implícita** del plano, expresada en coordenadas homogéneas.

Dados tres puntos proyectivos $P = [(u_0, u_1, u_2, u_3)]$, $Q = [(v_0, v_1, v_2, v_3)]$ y $S = [(s_0, s_1, s_2, s_3)]$ de \mathbb{P}^3 , desarrollemos un procedimiento para hallar la ecuación implícita del plano que engendran $\mathcal{V}(P, Q, S)$. Al igual que con la ecuación paramétrica, no haremos más que adaptar el apartado 3.1.2 a nuestro caso.

Recordemos que la primera forma de hacer esto que se comentó era, dado que $P, Q, S \in \mathcal{V}(P, Q, S)$, sustituir en la ecuación (3.11) las coordenadas de vectores representantes de los tres puntos proyectivos y resolver el sistema. Sin embargo, no era la más eficaz.

$$\begin{aligned} au_0 + bu_1 + cu_2 + du_3 &= 0 \\ av_0 + bv_1 + cv_2 + dv_3 &= 0 \\ as_0 + bs_1 + cs_2 + ds_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Otra forma, bastante mejor que la anterior, era interpretar las ecuaciones anteriores como el producto escalar entre el vector (a, b, c, d) y los vectores representantes de los puntos P, Q y S . Esto en la recta nos llevaba a un producto vectorial. Sin embargo, en \mathbb{R}^4 no está definido. Por tanto, debemos darle a las ecuaciones otra interpretación, para así hallar una forma más fácil de calcular la ecuación implícita de un plano.

Por un momento, observemos la ecuación (3.11) como la ecuación implícita del hiperplano H cuya proyección es el plano proyectivo $\mathcal{V}(P, Q, S)$. Si consideramos x, y, z y t como coordenadas de un punto de H , dado que los vectores u, v, t forman una base de dicho plano, como se explicó en el apartado anterior, el vector (x, y, z, t) será combinación lineal de ellos, y por tanto el conjunto $\{(x, y, z, t), u, v, s\}$ será linealmente dependiente. Con ello el determinante

$$\begin{vmatrix} x & y & z & t \\ u_0 & u_1 & u_2 & u_3 \\ v_0 & v_1 & v_2 & v_3 \\ s_0 & s_1 & s_2 & s_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.13)$$

debe ser nulo. De esta forma, dado que las únicas incógnitas con x, y, z y t y la ecuación implícita es única salvo múltiplos, el resultado de ese determinante será la ecuación implícita del hiperplano H , que por definición es la ecuación implícita del plano proyectivo $\mathcal{V}(P, Q, S)$.

Observación 3.2.2. Aunque el procedimiento utilizado para calcular la ecuación implícita de una recta de \mathbb{P}^2 a través del producto vectorial no es generalizable a otros hiperplanos, como acabamos de ver, el desarrollado en este apartado sí lo es. Por ello, no se explicará como hallar la ecuación implícita de un hiperplano proyectivo general, ya que bastará con seguir los pasos de esta sección, adaptándolos a las dimensiones pertinentes. Esto implica evidentemente, que la ecuación implícita de una recta de \mathbb{P}^2 se puede hallar también a través de este procedimiento. \diamond

3.3. Haz de hiperplanos

En este apartado retomaremos el espacio proyectivo dual y le daremos otra utilidad, que nos será de gran ayuda a la hora de calcular intersecciones de hiperplanos.

3.3.1. Haz de rectas

Por el momento, dado que es mucho más intuitivo explicar el concepto con hiperplanos concretos, empezaremos trabajando con rectas en \mathbb{P}^2 .

Definición 3.3.1. Dado un punto $p \in \mathbb{P}^2$, se define el *haz de rectas* por el punto p , o con base p , al conjunto de todas las rectas de \mathbb{P}^2 que pasan por p .

Observemos que dos cualesquiera rectas de este haz generan el plano proyectivo. Por tanto dadas tres rectas del haz con ecuaciones implícitas

$$\begin{aligned} r : a_0x + a_1y + a_2z &= 0 \\ r' : b_0x + b_1y + b_2z &= 0 \\ r'' : c_0x + c_1y + c_2z &= 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

los sistemas de ecuaciones

$$\begin{cases} a_0x + a_1y + a_2z = 0 \\ b_0x + b_1y + b_2z = 0 \end{cases} \quad y \quad \begin{cases} a_0x + a_1y + a_2z = 0 \\ b_0x + b_1y + b_2z = 0 \\ c_0x + c_1y + c_2z = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

son equivalentes. Esto implica que una de las ecuaciones es combinación lineal de las otras dos. Por tanto, conocidas dos rectas del haz r y r' , la ecuación implícita en coordenadas homogéneas de cualquiera otra recta del haz vendrá dada por

$$\alpha(a_0x + a_1y + a_2z) + \beta(b_0x + b_1y + b_2z) = 0 \quad (3.16)$$

para determinados α y β . Si $\alpha \neq 0$ podemos dividir por él, y la ecuación quedaría

$$(a_0x + a_1y + a_2z) + \theta(b_0x + b_1y + b_2z) = 0 \quad \theta = \frac{\beta}{\alpha} \quad (3.17)$$

en coordenadas no homogéneas.

Así, si dadas dos rectas del haz queremos determinar otra recta s que pase por un punto q , distinto del punto p del haz, basta sustituir las coordenadas de un vector representante de dicho punto q que la ecuación (3.17), obteniendo así un valor de θ . Sustituyendo θ de nuevo en la ecuación (3.17) obtenemos la ecuación implícita de s .

Sin embargo, un haz de rectas admite una interpretación dual, que da mucho más juego. Veremos que lo obtenido sin el espacio proyectivo dual es compatible con lo que obtendremos a partir de él.

Recordando el principio de dualidad, *traduzcamos* la definición de haz de rectas. De esta forma, y dado que estamos en \mathbb{P}^2 , los puntos pasan a ser rectas, y las rectas, puntos. Por tanto, todas las rectas que se cortan en el punto p son todos los puntos que engendran la recta dual p^* . Con ello, todo haz de rectas con base p de \mathbb{P}^2 representa una recta p^* en el dual. Asimismo, gracias a la dualidad, toda recta p^* de \mathbb{P}^{2*} representa un haz de rectas con base p en \mathbb{P}^2 .

Por tanto, un haz de rectas p^* es una variedad proyectiva dual de dimensión 1, engendrada por dos puntos duales

$$p^* := \{\mathbb{P}(\mathcal{L}(r, r')) \mid r, r' \text{ son puntos de } \mathbb{P}^{2*}\} \quad (3.18)$$

Estos puntos son rectas en el espacio proyectivo \mathbb{P}^2 , por lo que tienen una ecuación implícita

$$a_0x + a_1y + a_2z = 0$$

Así, las coordenadas de una recta en el espacio proyectivo dual serán $(a_0 : a_1 : a_2)$. Por tanto, si se conocen dos rectas del haz, se conocen dos puntos del haz p^* , y podemos describirlo a través de ecuaciones paramétricas e implícitas.

Esta descripción es la misma que la realizada en el apartado 3.1, ya que al fin y al cabo se trata de describir una recta a partir de dos puntos, aunque todo ello se desarrolle en el espacio proyectivo dual.

Sean pues dos rectas r y r' del haz de rectas en \mathbb{P}^2 . Estas, por la ecuación (3.14), representan los puntos $(a_0 : a_1 : a_2)$ y $(b_0 : b_1 : b_2)$ en \mathbb{P}^{2*} . La ecuación paramétrica del haz de rectas, o recta dual p^* , es, en coordenadas homogéneas

$$p^* : \{[\alpha(a_0, a_1, a_2) + \beta(b_0, b_1, b_2) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}]\} \quad (3.19)$$

En coordenadas no homogéneas adopta la forma

$$p^* : \{[(a_0, a_1, a_2) + \theta(b_0, b_1, b_2)] \mid \theta \in \mathbb{P}^1\} = \{(a_0 + \theta b_0 : a_1 + \theta b_1 : a_2 + \theta b_2) \mid \theta \in \mathbb{P}^1\} \quad (3.20)$$

Hagamos una rápida comprobación de que esto es coherente con lo explicado al principio de este apartado, sin tener en cuenta la dualidad.

Los puntos que pertenecen al haz de rectas p^* en el dual son aquellos de la forma $(a_0 + \theta b_0 : a_1 + \theta b_1 : a_2 + \theta b_2)$. Es decir, traduciendo de nuevo, aquellas rectas de \mathbb{P}^2 cuya ecuación implícita es

$$(a_0 + \theta b_0)x + (a_1 + \theta b_1)y + (a_2 + \theta b_2)z = 0$$

son las que pertenecen al haz de rectas de \mathbb{P}^2 . Observamos que esta ecuación coincide con la ecuación (3.17), con la cual también habíamos deducido que todas las rectas del haz debían tener por ecuación implícita la ecuación (3.17). Por tanto, ambas representaciones coinciden.

Por último, hallemos la ecuación implícita de p^* . Guiándonos por el apartado 3.1 de nuevo, tenemos que la ecuación implícita de una recta, conocidos dos de sus puntos, es

$$((a_0, a_1, a_2) \times (b_0, b_1, b_2)) \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

O bien, a partir del apartado 3.2

$$\begin{vmatrix} u & v & w \\ a_0 & a_1 & a_2 \\ b_0 & b_1 & b_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.22)$$

Nótese que, en vez de llamar a las variables x, y, z , las hemos llamado u, v, w , para no confundir ecuaciones de rectas proyectivas con ecuaciones de rectas proyectivas duales.

Observación 3.3.1. Es importante observar que, por el mismo procedimiento, se puede describir una recta de \mathbb{P}^2 o una de \mathbb{P}^{2*} . La única diferencia es si consideramos los coeficientes de una ecuación como coordenadas de un punto o como coeficientes de una recta. \diamond

Intersección de dos rectas proyectivas

Anteriormente hemos estudiado varias formas de calcular la intersección de dos rectas de \mathbb{P}^2 . Sin embargo, el concepto de haz de rectas aun no había sido introducido. Una vez conocida su existencia, utilicémoslo para hallar la intersección de dos rectas r y r' en \mathbb{P}^2 , descritas por las siguientes ecuaciones implícitas

$$\begin{aligned} r : a_0x + a_1y + a_2z &= 0 \\ r' : b_0x + b_1y + b_2z &= 0 \end{aligned}$$

Como bien sabemos, dicha intersección es un punto $p = (p_0 : p_1 : p_2)$. Esto quiere decir que las dos rectas r y r' pertenecen al haz de rectas con base p .

Pasando al espacio dual estamos buscando una recta p^* de \mathbb{P}^{2*} , con ecuación implícita

$$p_0u + p_1v + p_2w = 0 \quad (3.23)$$

que contiene a los puntos $(a_0 : a_1 : a_2)$ y $(b_0 : b_1 : b_2)$.

La ecuación implícita de una recta que pasa por dos puntos viene dada por la ecuación (3.22). Sustituyendo los valores de los puntos contenidos en p^* obtenemos

$$\begin{vmatrix} u & v & w \\ a_0 & a_1 & a_2 \\ b_0 & b_1 & b_2 \end{vmatrix} = 0$$

$$(a_1b_2 - a_2b_1)u + (a_2b_0 - a_0b_2)v + (a_0b_1 - a_1b_0)w = 0$$

que se corresponde a la ecuación implícita de la recta dual p^* . Comparando con la ecuación (3.23) obtenemos que la intersección de las rectas r y r' de \mathbb{P}^2 es el punto

$$p = (a_1b_2 - a_2b_1 : a_2b_0 - a_0b_2 : a_0b_1 - a_1b_0)$$

3.3.2. Haz de hiperplanos

El concepto de haz de rectas puede generalizarse a un espacio proyectivo $\mathbb{P}(E)$, siempre que se considere un conjunto de hiperplanos. Hagamos una definición general.

Definición 3.3.2. Se llama haz de hiperplanos al conjunto de todos los hiperplanos de $\mathbb{P}(E)$ que contienen una variedad proyectiva dada $X \subset \mathbb{P}(E)$ de codimensión 2. Esa variedad X se llama base del haz.

Por ejemplo, en \mathbb{P}^3 , estaríamos hablando de un haz de planos con base la recta r por la cual pasan todos ellos.

Dado que se habla de haz de hiperplanos, estos vendrán descritos por una ecuación implícita. Por tanto, todas las explicaciones realizadas en el apartado anterior basándonos en las ecuaciones implícitas, sin usar el dual, son válidas para el caso general.

Además, la interpretación dual sigue correcta. Cada hiperplano de $\mathbb{P}(E)$ es un punto en el espacio proyectivo dual. La variedad X contenida en todos ellos, dado que tiene codimensión 2, es una recta en \mathbb{P}^* . Por tanto, todo haz de hiperplanos con base X de $\mathbb{P}(E)$ representa una recta X^* en el dual. De forma general, un haz de hiperplanos es una variedad proyectiva dual de dimensión 1.

Al igual que hicimos en el apartado anterior, podemos describir el haz de hiperplanos X^* , dado que es una recta del dual, a través de sus ecuaciones paramétricas. Dados dos hiperplanos del haz, tenemos dos puntos de X^* conocidos. Así, se reduce a hallar la ecuación implícita de una recta que pasa por dos puntos, problema descrito en la sección 3.1.1.

3.4. Teorema de Pappus

En esta sección enunciaremos un teorema clásico de la geometría del plano proyectivo, en cuya demostración usaremos lo visto a lo largo de este capítulo.

Teorema 3.4.1 (Teorema de Pappus). Sea $\mathbb{P}(E)$ un plano proyectivo y sean r y r' dos rectas diferentes de $\mathbb{P}(E)$. Entonces, para cualesquiera seis puntos distintos $A, B, C \in r$ y $A', B', C' \in r'$, los puntos

$$X = AB' \cap A'B ; \quad Y = AC' \cap A'C ; \quad Z = BC' \cap B'C$$

están alineados.

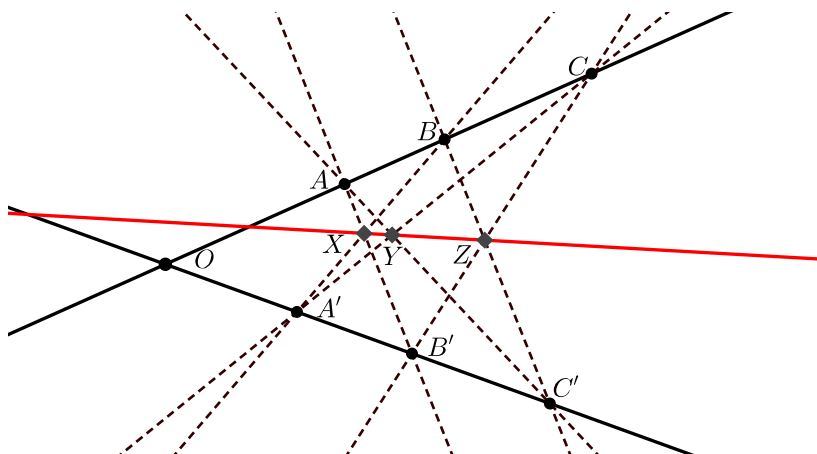


Figura 3.1: Ilustración del Teorema de Pappus.

Demostración. Dado que en el plano proyectivo las rectas son hiperplanos, y haciendo uso del corolario 1.3.2, las rectas r y r' se cortan en un punto O .

Si alguno de los seis puntos es O , el teorema es trivial ya que dos de los puntos X, Y y Z coincidirían, con lo que tendríamos dos puntos trivialmente alineados. Trataremos pues el caso en que todos ellos son diferentes de O .

La demostración consistirá en hallar las coordenadas de los puntos X, Y, Z y comprobar que están alineados. Para ello es necesario establecer una referencia proyectiva. Por comodidad elegimos

$$\mathfrak{R} = \{A, B, C'; B'\}$$

Comprobemos que es referencia. Por hipótesis, dado que son distintos, los puntos A, B y C' forman un triángulo no degenerado. Por tanto, para ver que cada 3 de ellos son proyectivamente independientes, bastaría comprobar que el punto B' no está en ninguno de los lados del triángulo ABC' .

Dado que $B' \in r' \setminus \{0\}$ es claro que no pertenece a la recta $AB = r$. Tampoco está en AC' ya que, en caso contrario, $B' \in r' \cap AC' = \{C'\}$, lo cual es absurdo pues los puntos B' y C' son distintos. Por último, no pertenece a BC' , pues en caso contrario de nuevo tendríamos que $B' \in r' \cap BC' = \{C'\}$.

Una vez demostrado que \mathfrak{R} es una referencia proyectiva, las coordenadas de los puntos A, B, C' y B' respecto a dicha referencia son

$$A = (1 : 0 : 0) ; \quad B = (0 : 1 : 0) ; \quad C' = (0 : 0 : 1) ; \quad B' = (1 : 1 : 1)$$

Estamos en situación de hallar las coordenadas de los puntos X, Y y Z respecto a la referencia \mathfrak{R} . Realizaremos el mismo procedimiento para todos los puntos: hallaremos las ecuaciones, paramétricas o implícitas, de las rectas cuya intersección es el punto en cuestión, y a partir de ellas calcularemos posteriormente dicha intersección.

■ Punto $X = AB' \cap A'B$.

Dado que las coordenadas respecto a nuestra referencia de los puntos A y B' son conocidas, la ecuación implícita de la recta AB' es

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow z - y = 0$$

Para la recta $A'B$ primero debemos hallar las coordenadas de A' respecto de \mathfrak{R} . Es un punto de $B'C' = r'$ distinto de O, B', C' . Las ecuaciones paramétricas de $B'C'$, tomando como representantes los vectores $(1, 1, 1)$ y $(0, 0, 1)$, son

$$r' = B'C' := \{[\lambda(1, 1, 1) + \mu(0, 0, 1)] \parallel \lambda, \mu \in E\} = \{(\lambda : \lambda : \mu + \lambda) \parallel \lambda, \mu \in E\} \quad (3.24)$$

Por lo que A' es un punto de la forma $(\lambda : \lambda : \mu + \lambda)$. Dado que no es el punto C' , $\lambda \neq 0$, pudiendo así dividir por λ . Queda

$$A' = (1 : 1 : 1 + \frac{\mu}{\lambda}) = (1 : 1 : \theta) \parallel \theta = 1 + \frac{\mu}{\lambda}$$

Tengamos en cuenta que como $A' \neq B'$, $\theta \neq 1$. Además, $A' \neq O$ por lo que nos falta una restricción para θ . Calculamos el punto O para hallarla. La ecuación implícita de $r = AB$ es

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow z = 0$$

Con ello se obtiene que el punto de corte cumple $\mu = -\lambda$. Por tanto, la intersección de ambas rectas es el punto $(\lambda : \lambda : 0) = (1 : 1 : 0)$. La restricción que debemos imponer a θ para que $A' \neq O$ es que $\theta \neq 0$. Así

$$A' = (1 : 1 : \theta) \parallel \theta = 1 + \frac{\mu}{\lambda}, \theta \neq 0, \theta \neq 1$$

La ecuación implícita de la recta $A'B$ es

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ 1 & 1 & \theta \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow \theta x + z = 0$$

Finalmente resolviendo el sistema

$$\begin{aligned} AB' : z - y &= 0 \\ A'B : \theta x + z &= 0 \end{aligned} \quad (3.25)$$

obtenemos el punto $X = AB' \cap A'B$

$$X = (1 : \theta : \theta) \quad (3.26)$$

- Punto $Z = BC' \cap B'C$.

La ecuación implícita de la recta BC' es

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow x = 0$$

Para describir la recta $B'C$ debemos hallar antes el punto C . Este se encuentra en la recta AB , que descrita a través de las ecuaciones paramétricas es

$$AB := \{[\alpha(1, 0, 0) + \beta(0, 1, 0)] \mid \alpha, \beta \in E\} = \{(\alpha : \beta : 0) \mid \alpha, \beta \in E\}$$

Dado que $C \neq B$, se tiene que $\alpha \neq 0$, por lo que podemos dividir por ella

$$C = (1 : \frac{\beta}{\alpha} : 0) = (1 : \mu : 0) \mid \mu = \frac{\beta}{\alpha}$$

Por otro lado $C \neq O = (1 : 1 : 0)$, lo cual implica que $\mu \neq 1$. Además $C \neq A$, por lo que $\mu \neq 0$. Así, finalmente el punto C es

$$C = (1 : \mu : 0) \mid \mu = \frac{\beta}{\alpha}, \mu \neq 0, \mu \neq 1$$

Ahora ya podemos calcular las ecuaciones paramétricas de la recta $B'C$, las cuales, en coordenadas no homogéneas, vienen dadas por

$$B'C := \{[(1, \mu, 0) + \nu(1, 1, 1)] \mid \nu \in \mathbb{P}^1\} = \{(1 + \nu : \mu + \nu : \nu) \mid \nu \in \mathbb{P}^1\}$$

El punto de intersección de las rectas BC' y $B'C$ cumple $1 + \nu = 0$. Por tanto, $\nu = -1$ y la intersección de ambas es

$$Z = (0 : \mu - 1 : -1) \quad (3.27)$$

- Punto $Y = AC' \cap A'C$.

La ecuación implícita de la recta AC' es

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow y = 0$$

Por otro lado, las ecuaciones paramétricas de $A'C$, teniendo en cuenta las restricciones antes impuestas a θ y μ , son

$$A'C := \{[(1, 1, \theta) + \xi(1, \mu, 0)] \mid \xi \in \mathbb{P}^1\} = \{(1 + \xi : 1 + \mu\xi : \theta) \mid \xi \in \mathbb{P}^1\}$$

El punto de intersección de ambas rectas cumple $1 + \mu\xi = 0$, con lo cual $\xi = -\frac{1}{\mu}$. Finalmente el punto Y es

$$Y = (1 - \frac{1}{\mu} : 0 : \theta) = (\mu - 1 : 0 : \mu\theta) \quad (3.28)$$

Una vez que tenemos las coordenadas de los tres puntos respecto a la referencia \mathfrak{R} falta comprobar que están alineados. Para ello, sus representantes deben ser coplanarios, es decir, su determinante debe ser nulo. Haciendo uso de las ecuaciones (3.26), (3.28) y (3.27) comprobamos que esto se cumple

$$\begin{vmatrix} 1 & \mu - 1 & 0 \\ \theta & 0 & \mu - 1 \\ \theta & \mu\theta & -1 \end{vmatrix} = (\mu - 1)^2\theta - (\mu - 1)\mu\theta + (\mu - 1)\theta = \mu^2\theta + \theta - 2\mu\theta - \mu^2\theta + 2\mu\theta - \theta = 0$$

Es importante observar que en general el determinante de los representantes de tres puntos proyectivos no está bien definido, debido a que podemos coger múltiplos. Sin embargo en este caso, al ser igual a cero, sí lo está. Por ello, el teorema queda demostrado. ■

Recordemos que gracias al principio de dualidad, dado un teorema, automáticamente su dual es cierto. Así, podemos enunciar el Teorema de Pappus para el plano proyectivo dual y quedará demostrado, por el simple hecho de haber demostrado el teorema en el plano proyectivo.

Teorema 3.4.2 (Teorema de Pappus Dual). *Sea $\mathbb{P}(E^*) = \mathbb{P}^*$ un plano proyectivo dual y sean R y R' dos puntos distintos de \mathbb{P}^* . Entonces, para cualesquiera seis rectas distintas a, b, c, a', b', c' tales que $R \in a, b, c$ y $R' \in a', b', c'$; las rectas*

$$\mathcal{V}(a \cap b', a' \cap b); \quad \mathcal{V}(a \cap c', a' \cap c); \quad \mathcal{V}(b \cap c', b' \cap c)$$

son concurrentes.

Demostración. Trivial por dualidad. ■

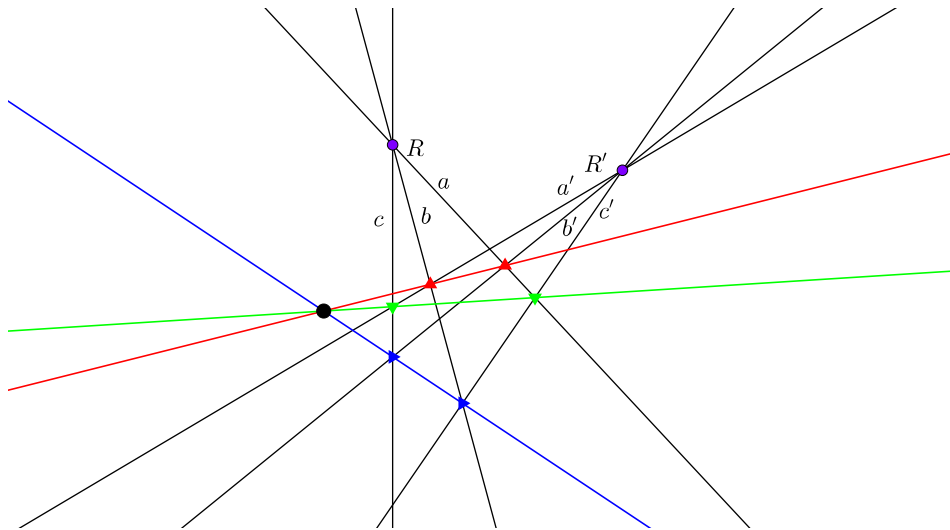


Figura 3.2: Ilustración del Teorema de Pappus Dual.

Capítulo 4

Aplicaciones Proyectivas

En este capítulo vamos a tratar de extrapolar uno de los conceptos más centrales del álgebra lineal al contexto proyectivo. Tratamos de estudiar las aplicaciones entre espacios proyectivos cuyo comportamiento consideramos “bueno”.

En el mundo lineal, estas aplicaciones eran los llamados homomorfismos entre espacios vectoriales o simplemente aplicaciones lineales. Aquí, en el mundo de los rayos, las llamaremos *aplicaciones proyectivas*.

4.1. Definición

Sean dos espacios proyectivos X e Y asociados a sendos espacios vectoriales, \widehat{X} e \widehat{Y} respectivamente.

Nuestro objetivo es definir una aplicación proyectiva entre dos espacios proyectivos a partir de una aplicación lineal entre sus respectivos espacios lineales de forma natural. Intentémoslo y veamos qué dificultades se nos presentan.

Sea $\widehat{h} : \widehat{X} \rightarrow \widehat{Y}$ una aplicación lineal arbitraria. Lo deseable sería definir la aplicación proyectiva asociada a \widehat{h} como aquella que, a cada rayo le asigna el rayo engendrado por la imagen de uno de sus representantes. Visto formalmente, si $x = [u]$:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{h} & Y \\ x \mapsto & & [\widehat{h}(u)] \end{array}$$

Este intento de definición tan intuitivo e inocente presenta dos problemas. El primero de ellos es que si $\widehat{h}(u) = 0$ entonces el rayo $[\widehat{h}(u)]$ no está definido.

Esto lo arreglamos de una forma natural, restringiendo el dominio de \widehat{h} a los vectores de \widehat{X} que no se anulan mediante \widehat{h} . Es decir, ahora \widehat{h} queda definida en $\widehat{X} \setminus \ker(\widehat{h})$.

Trasladando esta restricción al contexto proyectivo obtenemos este segundo intento de definición de aplicación proyectiva asociada a cierta aplicación lineal:

$$\begin{array}{ccc} X \setminus \mathbb{P}(\ker(\widehat{h})) & \xrightarrow{h} & Y \\ x \mapsto & & [\widehat{h}(u)] \end{array}$$

Antes de hacer algunas aclaraciones adicionales acerca de este primer problema que se nos ha presentado, demos una pequeña definición (por comodidad tipográfica).

Definición 4.1.1 (Centro). Se denomina *centro* de una aplicación h , dada la aplicación lineal asociada \widehat{h} entre dos espacios lineales \widehat{X} e \widehat{Y} , a la variedad proyectiva:

$$\mathcal{Z} \stackrel{\text{not.}}{=} \mathbb{P}(\ker(\widehat{h}))$$

Tras este breve inciso sobre la notación, veamos que, en efecto, hemos resuelto el problema que se nos planteaba, es decir, hemos eliminado del dominio todos los rayos que no tenían imagen definida. Si hubiera algún rayo con imagen no definida, alguno de sus representantes debería pertenecer al núcleo de \hat{h} (y por tanto todos). Pero esto no es posible ya que el rayo engendrado por este representante estaría en el centro de h .

El segundo problema que planteaba nuestra definición era saber si está bien definida. En efecto, siempre que definamos una aplicación y los elementos de nuestro conjunto de salida no tengan una representación única, debemos comprobar que la imagen de la función es independiente del representante escogido. En este caso es un juego de niños:

Sean $[u'] = x = [u]$. Es evidente que $u' = \lambda u$ para cierto λ no nulo. Entonces:

$$[\hat{h}(u')] = [\hat{h}(\lambda u)] = [\lambda \hat{h}(u)] = [\hat{h}(u)]$$

Para terminar la sección advertimos de que en algunos textos, a la hora de representar una aplicación proyectiva omiten (abusando de notación) especificar que al espacio de partida se le extrae el centro \mathcal{Z} .

4.2. Propiedades Elementales

En esta sección estudiaremos diversas propiedades básicas de las aplicaciones proyectivas.

Comencemos viendo cuál es la relación entre las aplicaciones proyectivas inyectivas (y respectivamente sobreyectivas) y sus aplicaciones lineales asociadas.

Lema 4.2.1 (Inyectividad y Sobreyectividad). *Sea h una aplicación proyectiva. Se cumple:*

1. h es inyectiva si y solo si lo es \hat{h} .
2. h es sobreyectiva si y solo si lo es \hat{h} .

Demostración. 1. Suponiendo que h es inyectiva, si \hat{h} no lo fuera, entonces tendría un núcleo no trivial, es decir, existiría cierto $u \neq 0$ tal que $\hat{h}(u) = 0$. A su vez, como \hat{h} no puede ser la aplicación idénticamente nula, existirá un $v \neq 0$ de manera que $\hat{h}(v) \neq 0$. Es un ejercicio trivial (que se deja al lector) la comprobación de que los vectores v y $w = u + v$ son linealmente independientes. Esto quiere decir que los puntos proyectivos $x = [v]$ e $y = [w]$ son distintos. Sin embargo, al tomar sus imágenes por h obtenemos:

$$h(y) = [\hat{h}(w)] = [\hat{h}(u + v)] = [\hat{h}(u) + \hat{h}(v)] = [\hat{h}(v)] = h(x)$$

Lo cual contradice nuestra hipótesis. Recíprocamente, si \hat{h} es inyectiva, usando la definición de aplicación proyectiva y la linealidad e inyectividad de \hat{h} tenemos que:

$$\begin{aligned} h(x) = h(y) &\Leftrightarrow h([u]) = h([v]) \Leftrightarrow [\hat{h}(u)] = [\hat{h}(v)] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \hat{h}(u) = \lambda \hat{h}(v) \Leftrightarrow \hat{h}(u) = \hat{h}(\lambda v) \Leftrightarrow u = \lambda v \Leftrightarrow [u] = [v] \Leftrightarrow x = y \end{aligned} \quad (4.1)$$

2. Suponiendo que \hat{h} es sobreyectiva, dado un $y \in Y$, veamos que existe un $x \in X \setminus \mathcal{Z}$ tal que $h(x) = y$. En efecto, $y = [v]$, como \hat{h} es sobreyectiva, existe un $u \in \hat{X}$ tal que $\hat{h}(u) = v$, luego, tomando clases:

$$h(x) = [\hat{h}(u)] = [v] = y$$

Recíprocamente, si h es sobreyectiva, dado $v \in \hat{Y}$ es claro que existe un $x \in X \setminus \mathcal{Z}$ tal que:

$$h(x) = [\hat{h}(u)] = [v]$$

Luego $v = \hat{h}(\lambda u)$, lo que prueba la sobreyectividad de \hat{h} . ■

Corolario 4.2.2 (Biyectividad). *Una aplicación proyectiva es biyectiva si y solo si su aplicación lineal asociada es un isomorfismo.*

Veamos con un ejemplo que ya, con lo poco que sabemos podemos demostrar cosas bastante interesantes:

Ejemplo 4.2.1 (Aplicaciones No Inyectivas Constantes). Veamos que las aplicaciones proyectivas no inyectivas que parten de un subespacio proyectivo de dimensión 1 son constantes.

Para ello usamos el lema 4.2.1. Si una aplicación cumpliera las características de nuestra hipótesis, su aplicación lineal correspondiente partiría de un espacio vectorial de dimensión 2 y tampoco sería inyectiva, siendo su núcleo un subespacio de dimensión 1 y su imagen otro subespacio de dimensión 1. Al proyectivizar nos que nuestra aplicación parte de un espacio proyectivo de dimensión 1 (extrayendo el punto asociado al núcleo) y llega a un espacio proyectivo conformado por un único punto (el proyectivizado de la imagen de su aplicación lineal). \diamond

Veamos ahora que, tanto la imagen como la imagen inversa de una variedad por una aplicación proyectiva es otra variedad.

Lema 4.2.3 (Preservación de Variedades). *Sea $h : X \setminus \mathcal{Z}$ una aplicación proyectiva se cumple que:*

1. *Dada una variedad $W \subset X$, entonces $h(W \setminus \mathcal{Z})$ es una variedad de Y . Además:*

$$\pi^{-1}(h(W \setminus \mathcal{Z})) = \widehat{h(W)}$$

2. *Dada una variedad $W' \subset Y$, entonces $h^{-1}(W') \cup \mathcal{Z}$ es una variedad de X . Además:*

$$\pi^{-1}(h^{-1}(W') \cup \mathcal{Z}) = \widehat{h^{-1}(W')}$$

Demostración. Probaremos únicamente el segundo apartado (el otro se demuestra de forma análoga). Probemos en primer lugar el “además”, de donde deduciremos automáticamente el resultado.

Sea $w \in \widehat{h^{-1}(W')}$. Esto es equivalente a decir que $\widehat{h}(w) \in \widehat{W'}$. En caso de que $\widehat{h}(w) = 0$ tendríamos que $[w] \in \mathcal{Z}$. En caso contrario tenemos:

$$[\widehat{h}(w)] = h([w]) \in W' \Leftrightarrow [w] \in h^{-1}(W')$$

Saltando al espacio lineal, combinando ambos casos, tenemos que:

$$w \in \pi^{-1}(h^{-1}(W') \cup \mathcal{Z})$$

Como todos los pasos que hemos hecho son equivalencias, también tenemos el otro contenido.

Como $\widehat{h^{-1}(W')}$ es un subespacio vectorial, $\pi^{-1}(h^{-1}(W') \cup \mathcal{Z})$ también lo es, y por ende, al proyectivizar obtendremos una variedad proyectiva, que es precisamente $h^{-1}(W') \cup \mathcal{Z}$. \blacksquare

Pasemos a comprobar cómo se comportan las aplicaciones proyectivas respecto de la composición.

Lema 4.2.4 (Composición de Aplicaciones Proyectivas). *La composición de dos aplicaciones proyectivas (f y g) es una aplicación proyectiva, siempre y cuando la composición de sus respectivas aplicaciones lineales asociadas no sea idénticamente nula ($\widehat{f} \circ \widehat{g} \neq 0$).*

Además, $\widehat{f \circ g} = \widehat{f} \circ \widehat{g}$.

Demostración. Demostrando el “además” el resultado se sigue:

$$\begin{aligned} X_1 \setminus \mathcal{Z}_1 &\xrightarrow{g} X_2 \setminus \mathcal{Z}_2 \xrightarrow{f} X_3 \\ [u] \mapsto g([u]) &= [\widehat{g}(u)] \mapsto (f \circ g)([u]) = f([\widehat{g}(u)]) = [\widehat{f}(\widehat{g}(u))] = [(\widehat{f} \circ \widehat{g})(u)] \end{aligned}$$

Además, nótese que $\widehat{\mathcal{Z}}_1 \subset \ker(\widehat{f} \circ \widehat{g})$ y por ende $\widehat{g^{-1}(\widehat{\mathcal{Z}}_2)} = \ker(\widehat{f} \circ \widehat{g})$. Esto quiere decir:

$$\mathcal{Z} = \mathbb{P}(\widehat{g^{-1}(\widehat{\mathcal{Z}}_2)})$$

Por ende $\widehat{f} \circ \widehat{g} = 0 \Leftrightarrow \widehat{g}(\widehat{X}_1) \subset \widehat{\mathcal{Z}}_2$. \blacksquare

Un resultado deseable, aunque para nada inmediato, es el de que podamos clasificar a las aplicaciones lineales que inducen cierta aplicación proyectiva por ser múltiplos entre si. Veámoslo:

Teorema 4.2.5 (Lema de la Correspondencia). *Dos aplicaciones lineales no nulas producen la misma aplicación proyectiva si y solo si son múltiplos la una de la otra.*

Demostración. \Rightarrow Sean dos aplicaciones lineales $\widehat{g}, \widehat{h} : E \rightarrow E'$ tales que inducen la misma aplicación proyectiva. Esto es:

$$\mathbb{P}(E) \setminus \mathcal{Z} \xrightarrow{\varphi} \mathbb{P}(E') \\ x = [u] \mapsto \varphi(x) = [\widehat{g}(u)] = [\widehat{h}(u)]$$

Para que esto pueda suceder es condición indispensable que ambas aplicaciones tengan el mismo kernel:

$$\mathcal{Z} = \mathbb{P}(\ker(\widehat{h})) = \mathbb{P}(\ker(\widehat{g})) \Leftrightarrow \ker(\widehat{h}) = \ker(\widehat{g})$$

Sabemos además que las imágenes de \widehat{g} y \widehat{h} son iguales salvo múltiplos para todos los vectores que no pertenecen al núcleo, con lo que:

$$[\widehat{g}(u)] = [\widehat{h}(u)] \quad \forall u \notin \mathcal{Z} \Rightarrow \widehat{g}(u) = \lambda_u \widehat{h}(u)$$

Por ende, nuestro objetivo es demostrar que dicho λ_u es el mismo para todos los vectores.

Distingamos dos casos (para no talar árboles de más echaremos las cuentas rápido).

- Sean $u, v \in E \setminus \ker(\widehat{g})$ tales que $u = \mu v$. Tenemos que:

$$\widehat{g}(u) = \lambda_u \widehat{h}(u) \Leftrightarrow \mu \widehat{g}(v) = \lambda_u \mu \widehat{h}(v) \Leftrightarrow \lambda_v \widehat{h}(v) = \lambda_u \widehat{h}(v) \Leftrightarrow \lambda_u = \lambda_v$$

- Sea $u, v \in E \setminus \ker(\widehat{g})$ linealmente independientes y sea $w = u + v$. Echando las cuentas:

$$\begin{aligned} \widehat{g}(w) = \lambda_w \widehat{h}(w) &\Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \widehat{g}(u) + \widehat{g}(v) = \lambda_w (\widehat{h}(u) + \widehat{h}(v)) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \lambda_u \widehat{h}(u) + \lambda_v \widehat{h}(v) = \lambda_w (\widehat{h}(u) + \widehat{h}(v)) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (\lambda_u - \lambda_w) \widehat{h}(u) + (\lambda_v - \lambda_w) \widehat{h}(v) = 0 \quad (4.2) \end{aligned}$$

Como $\widehat{h}(u)$ y $\widehat{h}(v)$ son linealmente independientes (compruébese), se tiene que:

$$\lambda_u = \lambda_v = \lambda_w$$

\Leftarrow Inmediato, ya que si $\widehat{h}(u) = \lambda \widehat{g}(u)$ para todo u , tomando clases:

$$h(u) = [\widehat{h}(u)] = [\lambda \widehat{g}(u)] = [\widehat{g}(u)] = g(u)$$

■

Al teorema 4.2.5 le bautizamos con el nombre de “lema de la correspondencia”, porque lo que viene a decir (siendo muy retorcidos) es que las aplicaciones proyectivas entre dos espacios proyectivos están en biyección con los elementos del espacio proyectivo $\mathbb{P}(\text{Hom}(\widehat{X}, \widehat{Y}))$.

4.3. Proyecciones Cónicas

Dedicaremos esta sección al estudio de un tipo especialmente relevante de aplicaciones proyectivas no homográficas, las llamadas *proyecciones cónicas*.

Antes de lanzarnos al estudio general de estas aplicaciones presentemos un par de ejemplos que más adelante nos ayudarán a entender intuitivamente el por qué del apellido “cónicas” de estas aplicaciones.

Ejemplo 4.3.1 (Punto sobre Recta). En el plano proyectivo \mathbb{P}^2 consideramos un punto z y una recta Y (recordemos que es un subespacio proyectivo) tal que $z \notin Y$. En estas condiciones definimos la aplicación:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}^2 \setminus \{z\} &\xrightarrow{h} Y \\ x &\mapsto h(x) = \mathcal{V}(x, z) \cap Y \end{aligned}$$

◇

No demostraremos que la aplicación del ejemplo 4.3.1 es, en efecto, una aplicación proyectiva, ya que al final de la sección daremos una demostración general para todas las proyecciones cónicas, de las que esta aplicación en concreto es un caso particular.

El ejemplo 4.3.1 se puede generalizar para dimensiones superiores, basta mantener que z sea un punto de \mathbb{P}^n e Y un hiperplano.

Ejemplo 4.3.2 (Punto sobre Hiperplano). En el plano proyectivo \mathbb{P}^n consideramos el punto z y el hiperplano Y tal que $z \notin Y$. Definimos la aplicación:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}^n \setminus \{z\} &\xrightarrow{h} Y \\ x &\mapsto h(x) = \mathcal{V}(x, z) \cap Y \end{aligned}$$

◇

Otra generalización de los ejemplos anteriores es la siguiente (menos intuitiva y más difícil de ver):

Ejemplo 4.3.3. En el espacio proyectivo \mathbb{P}^3 se consideran las rectas l y l' tales que $l \cap l' = \emptyset$. Definimos la aplicación:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}^3 \setminus l &\xrightarrow{h} l' \\ x &\mapsto \mathcal{V}(x, l) \cap l' \end{aligned}$$

◇

Observamos simplemente que $\mathcal{V}(x, l) \cap l'$ siempre se corta con l en un punto (consecuencia inmediata de la fórmula de Grassmann).

Llegados a este punto, ha llegado la hora de definir *proyección cónica* en toda su generalidad.

Definición 4.3.1 (Proyección Cónica). Sean X un espacio proyectivo y Z e Y dos variedades proyectivas de X tales que:

1. $Z \cap Y = \emptyset$
2. $\dim(Z) + \dim(Y) = \dim(X) - 1$

Definimos la aplicación:

$$\begin{aligned} X \setminus Z &\xrightarrow{h} Y \\ x &\mapsto \mathcal{V}(x, Z) \cap Y \end{aligned}$$

Automáticamente se nos presentan una serie de cuestiones que trataremos de responder a continuación:

1. ¿La intersección $\mathcal{V}(x, Z) \cap Y$ es siempre un único punto?
2. ¿ h es una aplicación proyectiva? ¿Cuál es su aplicación lineal asociada?

Como diría Jack el Destripador, vayamos por partes:

Proposición 4.3.1 (Intersección Unipuntual). *En las condiciones de la definición 4.3.1 la intersección $\mathcal{V}(x, Z) \cap Y$ tiene dimensión nula. Es decir, es un punto proyectivo.*

Demostración. Usando la fórmula de Grassmann:

$$\dim \mathcal{V}(\mathcal{V}(x, Z), Y) = \dim \mathcal{V}(x, Z) + \dim \mathcal{V}(Y) - \dim \mathcal{V}(x, Z) \cap Y \quad (4.3)$$

En primer lugar, veamos cuál es la dimensión de $\mathcal{V}(x, Z)$, para lo cual usaremos, de nuevo, la fórmula de Grassmann.

$$\dim \mathcal{V}(x, Z) = \dim(x) + \dim(Z) + \dim(x \cap Z) \quad (4.4)$$

Como $\dim(x) = 0$ (por ser un punto) y la dimensión de $\dim(x \cap Z) = -1$, ya que, por definición de proyección cónica $x \notin Z$, y por tanto $x \cap Z = \emptyset$. Sustituyendo en (4.4) se obtiene:

$$\dim \mathcal{V}(x, Z) = \dim(Z) + 1 \quad (4.5)$$

Sustituyendo este resultado en (4.3) obtenemos:

$$\dim \mathcal{V}(\mathcal{V}(x, Z), Y) = \dim(Z) + 1 + \dim \mathcal{V}(Y) - \dim \mathcal{V}(x, Z) \cap Y \quad (4.6)$$

Como, por hipótesis $\dim(Z) + \dim(Y) = \dim(X) - 1$, sustituyendo en (4.6) queda:

$$\dim \mathcal{V}(\mathcal{V}(x, Z), Y) = \dim(X) - \dim \mathcal{V}(x, Z) \cap Y \quad (4.7)$$

Centrémonos ahora en el otro miembro de la igualdad. En primer lugar, es claro que:

$$\dim \mathcal{V}(\mathcal{V}(x, Z), Y) = \dim \mathcal{V}(x, Z, Y)$$

Parece intuitivo pensar que Z e Y generan X . Veámoslo:

$$\dim \mathcal{V}(Z, Y) = \dim(Z) + \dim(Y) - \dim(Z \cap Y) \quad (4.8)$$

Como, por hipótesis, $Z \cap Y$ es el vacío, y, además, la suma de las dimensiones de Z e Y dan la dimensión de X menos 1, nos queda que, efectivamente:

$$\dim \mathcal{V}(Z, Y) = \dim(X) \quad (4.9)$$

Por ende, $\dim \mathcal{V}(Z, Y, x) = \dim(X)$, y, podemos sustituir en (4.7):

$$\dim(X) = \dim(X) - \dim \mathcal{V}(x, Z) \cap Y \quad (4.10)$$

Despejando, el resultado se sigue inmediatamente. ■

La proposición 4.3.1 prueba que h está bien definida como aplicación.

Una pequeña observación antes de probar que las proyecciones cónicas son, efectivamente, aplicaciones proyectivas, es que los espacios lineales asociados a Z y a Y son complementarios.

Observación 4.3.1 (Espacios Lineales Complementarios). Como la intersección de las variedades proyectivas Z e Y es el vacío, esta intersección tiene dimensión -1 . Por ende, el espacio lineal asociado a esta intersección es el nulo. Es decir:

$$Z \cap Y = \emptyset \Leftrightarrow \widehat{Z} \cap \widehat{Y} = \{0\}$$

Además, la suma de las dimensiones de Z e Y es la dimensión de X menos 1. Usando esto:

$$\begin{aligned} \dim(Y) + \dim(Z) &= \dim(X) - 1 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \dim(\widehat{Y}) - 1 + \dim(\widehat{Z}) - 1 = \dim(\widehat{X}) - 1 - 1 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \dim(\widehat{Y}) + \dim(\widehat{Z}) - 2 = \dim(\widehat{X}) - 2 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \dim(\widehat{Y}) + \dim(\widehat{Z}) = \dim(\widehat{X}) \end{aligned}$$

En su conjunto, esto quiere decir que se tiene la siguiente descomposición en suma directa del espacio lineal:

$$\widehat{X} = \widehat{Y} \oplus \widehat{Z}$$

◇

Probemos ahora que las proyecciones cónicas son aplicaciones proyectivas. Y que, de hecho, son las aplicaciones proyectivas asociadas a *proyecciones vectoriales*. (De ahí surge el nombre de “proyección”).

Proposición 4.3.2 (Proyección Vectorial). *La aplicación h tiene a la siguiente aplicación lineal (proyección vectorial de \widehat{X} sobre \widehat{Y}) como asociada:*

$$\begin{aligned}\widehat{X} &= \widehat{Z} \oplus \widehat{Y} \xrightarrow{\widehat{h}} \widehat{Y} \\ u = v + w &\mapsto w\end{aligned}$$

Siendo $v \in \widehat{Z}$ y $w \in \widehat{Y}$, es decir, la descomposición de x en suma de vectores de \widehat{Z} e \widehat{Y} .

Demostración. Comprobar que \widehat{h} es una aplicación lineal con núcleo \widehat{Z} es inmediato y se deja al lector. Hecho esto, suponiendo que $x = [u]$, basta ver que $h(x) = [\widehat{h}(u)]$ para cualquier $x \in X$.

$$[\widehat{h}(u)] = [\widehat{h}(v + w)] = [w]$$

Veamos que $[w] \in \mathcal{V}(x, Z) \cap Y$, demostrando así lo que queríamos.

En primer lugar, sabemos que w no es el vector nulo, ya que si lo fuera, el rayo x estaría en el centro. Dicho esto, como $Y = \mathbb{P}(\widehat{Y})$, y como $w \in \widehat{Y}$, entonces $[w] \in Y$.

Para demostrar que $[w] \in \mathcal{V}(x, Z)$ basta con darse cuenta de que $\mathcal{V}(x, Z) = \mathbb{P}(\mathcal{L}(u, \widehat{Z}))$. Como $u = v + w$ se tiene que $w = u - v \in \mathcal{L}(u, \widehat{Z})$, luego, tomando clases:

$$[w] = [u - v] \in \mathbb{P}(\mathcal{L}(u, \widehat{Z})) = \mathcal{V}(x, Z)$$

■

La proposición 4.3.2 demuestra que las proyecciones cónicas en general son aplicaciones proyectivas, dando la aplicación lineal asociada (una proyección vectorial).

Antes de finalizar la sección daremos una explicación del por qué del apellido “cónicas” de estas aplicaciones. Además, daremos dos ejemplos detallados para que el lector se familiarice con el tratamiento de estas aplicaciones, y que, además, constituye un gran repaso de capítulos anteriores. Por último propondremos un ejercicio al lector.

Observación 4.3.2 (Cónicas). Este apellido es debido a que, en el caso particular presentado en el ejemplo 4.3.2, si tomamos la imagen de una circunferencia por la proyección cónica obtenemos una curva cónica. Esta curva es la formada por la intersección entre el hiperplano Y la familia de rectas que pasan por z y un punto de la circunferencia. ◇

El siguiente ejemplo ilustra la importancia de asegurarse de que cumplimos con todos los requisitos a la hora de definir una proyección cónica.

Ejemplo 4.3.4 (Proyección Punto – Plano Degenerada). Dado el punto $z = (1 : 0 : -1 : 1)$ y el plano $\pi : 2x - y + z - t = 0$, se pide hallar la imagen de un punto genérico $p = (x : y : z : t)$ por la proyección cónica con centro z sobre π .

Por definición tenemos que $h(p) = zp \cap \pi$. Dicho de otra forma, nuestro trabajo se reduce a calcular la intersección de una recta y un plano. Como tenemos el plano π expresado en forma de su ecuación implícita, tratemos de hallar las ecuaciones paramétricas de zp . Estas son, en su versión no homogénea:

$$zp : [(x + \theta : y : z - \theta : t + \theta)]$$

Así pues ahora solo basta con sustituir en la ecuación implícita de π y despejar θ . Sin embargo:

$$2(x + \theta) - y + (z - \theta) - (t + \theta) = 0 \Leftrightarrow 2x - y + z - t = 0$$

Como vemos, θ se ha esfumado en el proceso. ¿Como debemos interpretar este resultado? Bueno, quizá ayude imaginarse que p es un punto concreto, es decir, que las variables x, y, z, t de la anterior ecuación son “numeracos”.

Hecho esto, nos quedará un número igualado a 0. Si esta igualdad es falsa uno podría pensar que la recta no corta al plano nunca (ya que no lo hace para ningún valor de θ), pero esto sabemos

que no es así, ya que una recta y un hiperplano siempre se cortan. Es en este momento cuando hay que recordar que hay ocasiones en las que θ no está definido, en concreto, ningún valor de θ nos define el punto z . Por ende, este es el punto de corte.

En otro caso, nos puede quedar la igualdad trivial, que no quiere decir otra cosa que que la recta zp está contenida en el plano π . Por ende, en este caso, la imagen de $p \in \pi$ no está bien definida, ya que es toda una recta. \diamond

Ejercicio 4.1 (Clasificación de Proyecciones Cónicas). Enumere las proyecciones cónicas de \mathbb{P}^4 , clasificándolas en función de las subvariedades Z e Y que las caracterizan.

4.4. Homografías

En esta sección introduciremos unas aplicaciones proyectivas bastante notables, las llamadas “homografías”, que se estudiarán con enorme profundidad en capítulos posteriores.

Definición 4.4.1 (Homografía). Una aplicación proyectiva h se dice *homografía* si es inyectiva, es decir, si su centro es el vacío.

Antes de empezar a desgranar las propiedades de estas aplicaciones, pongamos un ejemplo notable que nos permitirá construir homografías en el plano proyectivo.

Ejemplo 4.4.1 (Fábrica de Homografías). Sean r y r' dos rectas distintas de \mathbb{P}^2 . Asimismo un punto proyectivo $c \in \mathbb{P}^2 \setminus \{r \cup r'\}$.

Definimos la aplicación:

$$\begin{aligned} \pi_c : r &\rightarrow r' \\ p &\mapsto \mathcal{V}(c, p) \cap r' \end{aligned}$$

Esta aplicación es una homografía, de hecho, es una restricción de la aplicación definida en el ejemplo 4.3.1. En definitiva, dado un punto y dos rectas, tenemos una homografía. \diamond

Una propiedad importante de las homografías es que pueden transformarse de forma natural a en aplicaciones biyectivas.

Observación 4.4.1 (Biyectividad de las Homografías). Al ser las homografías aplicaciones inyectivas, si la dimensión del espacio de partida y de llegada coinciden, la aplicación en cuestión es biyectiva. Este hecho se debe a la fórmula de las dimensiones para aplicaciones lineales.

En caso de que esto no ocurra, siempre podemos tomar como espacio de llegada la imagen de la aplicación en sí, que será un espacio proyectivo de la misma dimensión que el de partida. \diamond

4.4.1. Homografías y Teoría de Grupos

Algo objetivamente bonito de las homografías es que se relacionan muy fácilmente con la teoría de grupos. Así es como surge el concepto de “grupo proyectivo”.

Definición 4.4.2 (Grupo Proyectivo). Sea X un espacio proyectivo. Se llama *grupo proyectivo* de X al conjunto formado por todas las homografías de X en sí mismo con la operación de composición usual. A este grupo se le suele denotar $\mathbf{GP}(X)$.

La comprobación de que, efectivamente, el conjunto de las homografías de un subespacio en sí mismo tiene estructura de grupo es un sencillo ejercicio que se deja al lector.

Recordamos brevemente que denominábamos *grupo lineal* de un espacio vectorial \hat{X} al conjunto de sus automorfismos (isomorfismos de él en sí mismo) con la composición usual. A este grupo lo denotábamos $\mathbf{GL}(\hat{X})$.

Parece natural pensar que existe cierta relación entre los grupos lineal y proyectivo. Así es, gracias a todas las propiedades demostradas a lo largo del capítulo, podemos definir el siguiente homomorfismo sobreyectivo de grupos (compruébese).

$$\begin{aligned} \mathbf{GL}(\hat{X}) &\rightarrow \mathbf{GP}(X) \\ \hat{h} &\mapsto h \end{aligned}$$

A cualquiera que haya estudiado teoría de grupos esto le pide a gritos que calculemos el kernel del homomorfismo y apliquemos el llamado *Primer Teorema de Isomorfía*. Hagámoslo.

El elemento unidad del grupo proyectivo es la aplicación identidad, que lleva cada punto a sí mismo, como es claro que la aplicación lineal identidad es la asociada a esta aplicación proyectiva, también lo serán todos sus múltiplos (y solo esos) (teorema 4.2.5), con lo que queda calculado el kernel del homomorfismo, que es, por supuesto, un subgrupo normal de $\mathbf{GL}(\widehat{X})$.

A los múltiplos de la aplicación lineal identidad usualmente se les denomina *homotecias lineales*. Denominaremos H al conjunto de las homotecias lineales.

Aplicando el primer teorema de isomorfía tenemos que:

$$\mathbf{GP}(X) \cong \frac{\mathbf{GL}(\widehat{X})}{H}$$

Sin embargo, podemos ir aún más allá. Consideremos el siguiente homomorfismo inyectivo:

$$\begin{aligned} \mathbb{K}^* &\rightarrow \mathbf{GL}(\widehat{X}) \\ \lambda &\mapsto \lambda \text{id} \end{aligned}$$

Luego por el primer teorema de isomorfía se tiene que \mathbb{K}^* es isomorfo a H con lo que concluimos:

$$\mathbf{GP}(X) \cong \frac{\mathbf{GL}(\widehat{X})}{\mathbb{K}^*} \quad (4.11)$$

4.5. Aplicaciones Proyectivas y Matrices

Uno de los resultados más notables y relevantes del álgebra lineal es que una aplicación lineal queda totalmente determinada por la imagen de los vectores la base del espacio de partida. Tratemos de traducir esto al contexto de las aplicaciones proyectivas.

4.5.1. Recordatorio de Álgebra Lineal

Recordamos que, dado un vector $u \in E$ y un homomorfismo $h : E \rightarrow E'$, fijadas sendas bases \mathcal{B} y \mathcal{B}' de E y E' se tiene:

$$h(u) \equiv Y = M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(h)X \quad (4.12)$$

En este contexto, X representa una matriz columna cuyos coeficientes se corresponden con las coordenadas del vector u respecto de \mathcal{B} . Análogamente, Y es una matriz columna cuyos coeficientes son las coordenadas de $h(u)$ respecto de \mathcal{B}' . Por su parte, $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(h)$ es la llamada *matriz asociada a h* respecto de \mathcal{B} y \mathcal{B}' . Las columnas de la matriz $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(h)$ se corresponden con las coordenadas en la base \mathcal{B}' de la imagen de los vectores de la base \mathcal{B} .

Asimismo conviene recordar qué relación había entre $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(h)$ y $M_{\overline{\mathcal{B}}\overline{\mathcal{B}'}}(h)$. Esta relación era:

$$M_{\overline{\mathcal{B}}\overline{\mathcal{B}'}}(h) = Q^{-1}M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(h)P \quad (4.13)$$

Donde P^{-1} y Q^{-1} son, respectivamente, las matrices de cambio de base de \mathcal{B} a $\overline{\mathcal{B}}$ y de \mathcal{B}' a $\overline{\mathcal{B}'}$. (Ver apéndice A.1.1).

4.5.2. Matriz Asociada a una Aplicación Proyectiva

Sean dos espacios proyectivos X e Y . Consideremos las referencias proyectivas \mathfrak{R} y \mathfrak{R}' asociadas a X e Y respectivamente. Definamos una aplicación proyectiva $h : X \setminus \mathcal{Z} \rightarrow Y$ arbitraria.

Nuestro objetivo es, dadas las coordenadas homogéneas de cierto rayo $[w] \in X$ respecto de \mathfrak{R} , obtener las coordenadas homogéneas $h([w]) \in Y$ respecto de \mathfrak{R}' .

Denotando por W a la matriz columna cuyos coeficientes son las coordenadas homogéneas de w respecto de \mathfrak{R} (únicas salvo múltiplos). Se cumple que:

$$h([w]) = [\widehat{h}(w)] \equiv [M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(\widehat{h})W] \quad (4.14)$$

Nótese que hemos cometido un abuso de notación ya que $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(\hat{h})W$ es una matriz columna, sin embargo la consideramos como un vector para poder tomar el rayo engendrado por él.

Sin embargo, que no cunda la euforia, todavía tenemos un problema por subsanar, ya que al ser las bases asociadas a \mathfrak{R} y \mathfrak{R}' únicas salvo múltiplos nadie me impide coger la base $\lambda\mathcal{B}$ (para cierto escalar λ no nulo) en lugar de la base \mathcal{B} .

Sin embargo, las matrices de cambio entre bases asociadas (y sus inversas) son múltiplos de la identidad (por ser las unas múltiplos de las otras). Esta propiedad trae a colación un viejo resultado acerca de matrices que reza que la multiplicar una matriz (ya sea por la izquierda o por la derecha) por λI_n es equivalente a multiplicar la matriz por λ . Así pues tenemos que:

$$h([w]) := [M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(\hat{h})W] = [M_{\lambda\mathcal{B}\mu\mathcal{B}'}(\hat{h})W] = [M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(\hat{h})\lambda\mu W] = [M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(\hat{h})W] =: h([w]) \quad (4.15)$$

Pongamos algunos ejemplos para asentar todo esto.

Ejemplo 4.5.1 (Transformaciones de Möbius). Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una aplicación proyectiva. Consideramos la referencia $\mathfrak{R} := \{[u], [v]; e\}$ cuya base asociada es $\mathcal{B} = \{u, v\}$. Sabemos además que $\hat{h}(u) = au + bv$ y que $\hat{h}(v) = cu + dv$.

Sea un punto $x = (x_0 : x_1)_{\mathfrak{R}}$, por lo que acabamos de ver, su imagen por h es:

$$h(x) = \rho(y_0 : y_1) = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}$$

Usualmente lo escribiremos de forma ecuacional:

$$\begin{aligned} \rho y_0 &= ax_0 + cx_1 \\ \rho y_1 &= bx_0 + dx_1 \end{aligned}$$

Podríamos quedarnos ahí, sin embargo seguiremos el proceso de “deshomogeneización” habitual, que nos será de gran utilidad en el futuro.

Dividiendo sendas ecuaciones queda:

$$\frac{y_0}{y_1} = \frac{ax_0 + cx_1}{bx_0 + dx_1}$$

Si además dividimos el término de la derecha por x_1 tenemos:

$$\frac{y_0}{y_1} = \frac{a\frac{x_0}{x_1} + c}{b\frac{x_0}{x_1} + d}$$

Denotando $\theta' := \frac{y_0}{y_1}$ y $\theta := \frac{x_0}{x_1}$ nos queda:

$$\theta' = \frac{a\theta + c}{b\theta + d}$$

Antes de que se nos lapide por blasfemos, nótese que, como es evidente, hay indeterminaciones. En efecto cuando la segunda componente homogénea de nuestro punto inicial es nula el valor θ no está definido. Cuando esto pasa, el valor θ' es:

$$\theta' = \frac{ax_0}{bx_0} = \frac{a}{b}$$

Lo cual siempre está definido (salvo que b sea nulo). Es por esto que a veces se toma el siguiente convenio notacional, que hace realidad el sueño de todo chaval. Asignamos a θ el símbolo ∞ y operamos de la siguiente manera tan intuitiva (y peligrosa):

$$\theta' = \frac{a\infty + c}{b\infty + d} = \frac{a\cancel{\infty}}{b\cancel{\infty}} = \frac{a}{b}$$

Aunque puede seguirse este convenio (y en ocasiones lo haremos), ante la duda, se recomienda pasar todo al terreno estable de las coordenadas homogéneas.

Para no perder el contexto, nótese que ahora nuestro punto inicial x queda totalmente determinado por θ (admitiendo que pueda tomar el como valor el símbolo ∞ cuando la segunda coordenada homogénea sea 0, ya que al fin y al cabo esto sólo pasa para un único rayo).

Asimismo, $h(x)$ queda totalmente determinado por el valor θ' , asumiendo a su vez que puede tomar como valor ∞ cuando su segunda coordenada homogénea se anule.

Estas transformaciones nos de enorme utilidad en el análisis complejo, es por ello que tienen nombre propio, *transformaciones de Möbius*. \diamond

En este ejemplo se generalizamos la idea del anterior para una proyección cónica.

Ejemplo 4.5.2 (Proyección Punto – Plano). Dado el punto $z = (1 : 0 : -1 : 2)$ y el plano $\pi : 2x - y + z - t = 0$, se pide hallar la imagen de un punto genérico $p = (x : y : z : t)$ por la proyección cónica con centro z sobre π .

Por definición, $h(p) = zp \cap \pi$. Hallemos las ecuaciones paramétricas de la recta zp para sustituir en la ecuación paramétrica de π y así hallar la intersección.

$$zp : (x + \theta : y : z + \theta : t + \theta)$$

Sustituyendo en la ecuación implícita de π y despejando θ obtenemos:

$$\theta = -\frac{1}{2}(2x - y + z - t)$$

De este modo, la imagen por h de un punto p arbitrario es:

$$h(p) = (y - z + t : 2y : -2x + y + z + t : -2x + y - z + 3t)$$

Algunos consejos para comprobar si, en efecto, hemos echado bien las cuentas son:

- Comprobar que el punto z no debe tener imagen definida, es decir, nos debe dar el punto $(0 : 0 : 0 : 0)$.
- Comprobar que los puntos del plano π quedan invariantes por h .

Una vez hecho esto podemos hallar la matriz asociada a la aplicación lineal subyacente. Para ello basta hallar las imágenes de los rayos asociados a la base canónica de \mathbb{R}^4 . Nos queda:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ -2 & 1 & 1 & 1 \\ -2 & 1 & -1 & 3 \end{pmatrix}$$

Esta matriz tiene rango 3 ya que la aplicación proyectiva tiene un punto por centro.

Expresemos esto de forma ecuacional, simplemente porque podemos:

$$\begin{aligned} \rho x' &= y - z + t \\ \rho y' &= 2y \\ \rho z' &= -2x + y + z + t \\ \rho t' &= -2x + y - z + 3t \end{aligned}$$

Tal y como hicimos en el ejemplo anterior (aquí lo hacemos con mucho menos detalle), podemos realizar el proceso de deshomogeneización habitual dividiendo todo por la última ecuación y, tras esto, dividiendo los miembros de la derecha por t . Si lo hacemos nos queda:

$$X' = \frac{Y - Z + 1}{-2X + Y - Z + 3} \quad Y' = \frac{2Y}{-2X + Y + Z + 3} \quad Z' = \frac{-2X + Y + Z + 1}{-2X + Y - Z + 3}$$

Observemos que hemos introducido las notaciones:

$$X' = \frac{x}{t} \quad Y' = \frac{y}{t} \quad Z' = \frac{z}{t}$$

Es claro que en todo este proceso quedan por definir un montón de singularidades, en concreto, queda indefinido todo el plano $\pi' : -2x + y - z + 3t = 0$, que puede interpretarse como el plano paralelo a π que pasa por z . \diamond

Antes de finalizar el capítulo, hagamos un pequeño inciso. Cuando trabajemos con aplicaciones de un espacio en sí mismo conviene fijar la misma referencia \mathfrak{R} para ambos espacios. Veamos un ejemplo de por qué esto es conveniente.

Ejemplo 4.5.3 (Identidad). Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una aplicación proyectiva. Fijada la referencia proyectiva $\mathfrak{R} := \{[u], [v]; e\}$ del espacio de partida, supongamos que h es tal que podemos fijar la referencia proyectiva $\mathfrak{R}' := \{h([u]), h([v]); h(e)\}$ del espacio de llegada.

Se tiene entonces que la matriz asociada a la aplicación lineal asociada es la identidad. Este hecho perturba bastante a la hora de trabajar, por lo que debemos evitarlo. \diamond

Capítulo 5

Razón Doble

El objetivo de este capítulo es ver que, dadas dos rectas proyectivas $\mathbb{P}(E)$ y $\mathbb{P}(E')$, es decir con $\dim(E) = \dim(E') = 2$, existe una homografía que transforma cuatro puntos distintos cualesquiera de $\mathbb{P}(E)$ en otros cuatro puntos distintos de $\mathbb{P}(E')$. Esto nos llevará a la definición de razón doble y a estudiar sus características y propiedades.

5.1. Definición

Empecemos tratando un caso más sencillo, tres puntos. Es fácil demostrar haciendo uso del álgebra lineal, como haremos a continuación, que, dadas dos rectas proyectivas, existe una única homografía que transforma tres puntos distintos cualesquiera en otros tres puntos distintos.

Proposición 5.1.1. *Dadas dos rectas proyectivas, $\mathbb{P}(E)$ y $\mathbb{P}(E')$, y dadas dos ternas diferentes siempre existe una única homografía que transforma la una en la otra.*

Demostración. Sean $\{p_0, p_1, p_2\}$ tres puntos distintos de $\mathbb{P}(E)$. Al ser diferentes podemos tomar dicha terna como referencia proyectiva \mathfrak{R} de $\mathbb{P}(E)$. Esto nos proporcionará una base de E , la correspondiente base asociada \mathcal{B} a la referencia \mathfrak{R} . Sea la terna de puntos distintos $\{p'_0, p'_1, p'_2\}$ de la recta proyectiva $\mathbb{P}(E')$, podemos hacer lo mismo. Con ello obtenemos una base \mathcal{B}' de E' .

Existe un único isomorfismo

$$\widehat{h} : E \rightarrow E'$$

que transforma \mathcal{B} en \mathcal{B}' . La aplicación proyectiva asociada a esta aplicación lineal es una homografía que transforma p_i en p'_i , para $i = 0, 1, 2$. Además es única al serlo \widehat{h} . ■

Observación 5.1.1. La demostración de la proposición anterior nos permite deducir que dadas dos referencias proyectivas \mathfrak{R} y \mathfrak{R}' de dos rectas proyectivas, existe una única homografía que transforma \mathfrak{R} en \mathfrak{R}' . ◇

Veamos un ejemplo. Para ello recordemos primero que una homografía de la recta proyectiva en sí misma, tomando la misma referencia, puede definirse a través de coordenadas no homogéneas como

$$\frac{x'}{y'} = \theta' = \frac{a\frac{x}{y} + b}{c\frac{x}{y} + d} = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} \quad || \quad ad - bc \neq 0 \quad (5.1)$$

Ejemplo 5.1.1. Encontrar la homografía

$$h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$$

que transforma los puntos $\{(0 : 1), (1 : 0), (2 : 1)\}$ en los puntos $\{(1 : 1), (-1 : 1), (0 : 1)\}$.

Podemos resolver este ejercicio de varias formas. La primera consistiría en plantear las ecuaciones con la matriz asociada

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$$

y, sustituyendo los valores de los puntos dados, resolver el sistema de ecuaciones, cuyas incógnitas son a, b, c, d y ρ :

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} &= \rho \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} &= \rho \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} &= \rho \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Sin embargo, esto puede resultar muy pesado. Si utilizamos la definición de homografía dada por la ecuación (5.1), el cálculo resulta mucho más llevadero. Así, para determinar la homografía basta hallar la expresión en coordenadas no homogéneas que la define, que se obtiene sustituyendo los valores proporcionados en la ecuación (5.1) y resolviendo el sistema. Observamos que el punto $(1 : 0)$ se transforma en $\theta = \infty$. Para resolver esta indeterminación, se multiplica la fracción arriba y abajo por y

$$\theta' = \frac{a\frac{x}{y} + b}{c\frac{x}{y} + d} = \frac{ax + by}{cx + dy} \quad || \quad ad - bc \neq 0 \quad (5.2)$$

Así, las ecuaciones resultantes son

$$\begin{aligned}1 &= \frac{a0 + b1}{c0 + d1} = \frac{b}{d} \Rightarrow b = d \\ -1 &= \frac{a1 + b0}{c1 + d0} = \frac{a}{c} \Rightarrow a = -c \\ 0 &= \frac{a2 + b1}{c2 + d1} \Rightarrow 2a + b = 0\end{aligned}$$

Por lo que, tomando $a = 1$, la homografía pedida viene dada por

$$\theta' = \frac{2 - \theta}{2 + \theta}$$

Nótese que no es necesario tener tanto cuidado con $\theta = \infty$. Si tenemos en cuenta que $\infty + b = \infty$ y que $\frac{\infty}{\infty} = 1$, el resultado es el mismo

$$\theta' = -1 = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} = \frac{a\infty + b}{c\infty + d} = \frac{a\infty}{c\infty} = \frac{a}{c} \Rightarrow a = -c$$

Por tanto, a partir de ahora, daremos por buenos estos cálculos con ∞ en principio sin sentido. \diamond

Encontrar una homografía de una recta proyectiva que lleve cuatro puntos distintos cualesquiera en otros cuatro no es tan sencillo. Para poder caracterizar esta propiedad empezaremos estudiando las características de una homografía que la cumpla.

Lema 5.1.2. Sean $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ y $\{p'_1, p'_2, p'_3, p'_4\}$ ocho puntos distintos de la recta proyectiva $\mathbb{P}(E)$ respecto a la referencia \mathfrak{R} . Sea una homografía

$$h : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E)$$

que cumple $h(\theta_i) = \theta'_i$ para todo $i \in \{1, 2, 3, 4\}$, donde θ_i es el parámetro no homogéneo de p_i . Entonces

$$\frac{\theta_3 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2} : \frac{\theta_4 - \theta_1}{\theta_4 - \theta_2} = \frac{\theta'_3 - \theta'_1}{\theta'_3 - \theta'_2} : \frac{\theta'_4 - \theta'_1}{\theta'_4 - \theta'_2} \quad (5.3)$$

Demostración. Dado que h es una homografía de una recta proyectiva en sí misma, y hemos tomado la misma referencia, podemos escribir

$$\theta' = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} \quad || \quad ad - bc \neq 0$$

para determinados a, b, c y d . Así

$$\frac{\theta'_3 - \theta'_1}{\theta'_3 - \theta'_2} : \frac{\theta'_4 - \theta'_1}{\theta'_4 - \theta'_2} = \frac{\frac{a\theta_3+b}{c\theta_3+d} - \frac{a\theta_1+b}{c\theta_1+d}}{\frac{a\theta_3+b}{c\theta_3+d} - \frac{a\theta_2+b}{c\theta_2+d}} : \frac{\frac{a\theta_4+b}{c\theta_4+d} - \frac{a\theta_1+b}{c\theta_1+d}}{\frac{a\theta_4+b}{c\theta_4+d} - \frac{a\theta_2+b}{c\theta_2+d}}$$

Operando se obtiene

$$\frac{\theta'_3 - \theta'_1}{\theta'_3 - \theta'_2} : \frac{\theta'_4 - \theta'_1}{\theta'_4 - \theta'_2} = \frac{\frac{(\theta_3 - \theta_1)(ad - bc)}{(c\theta_3 + d)(c\theta_1 + d)}}{\frac{(\theta_3 - \theta_2)(ad - bc)}{(c\theta_3 + d)(c\theta_2 + d)}} : \frac{\frac{(\theta_4 - \theta_1)(ad - bc)}{(c\theta_4 + d)(c\theta_1 + d)}}{\frac{(\theta_4 - \theta_2)(ad - bc)}{(c\theta_4 + d)(c\theta_2 + d)}} = \frac{\theta_3 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2} : \frac{\theta_4 - \theta_1}{\theta_4 - \theta_2}$$

■

Por tanto, toda homografía de una recta proyectiva en sí misma que lleve cuatro puntos distintos a otros cuatro, mantiene invariante el cociente

$$\frac{\theta_3 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2} : \frac{\theta_4 - \theta_1}{\theta_4 - \theta_2}$$

Conviene entonces dar un nombre a dicho cociente.

Definición 5.1.1 (Razón doble). Sean cuatro puntos diferentes de una recta proyectiva $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, se define su *razón doble* como el cociente

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\} = \frac{\theta_3 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_2} : \frac{\theta_4 - \theta_1}{\theta_4 - \theta_2} \quad (5.4)$$

donde θ_i es el parámetro no homogéneo de p_i respecto a una referencia \mathfrak{R} de la recta proyectiva.

Observación 5.1.2. Dado que θ_i es el parámetro no homogéneo de p_i , el cálculo de la razón doble se puede hacer también usando coordenadas homogéneas. Si $p_i = (x_i, y_i)$, entonces, sustituyendo en la definición y operando

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \frac{\frac{x_3}{y_3} - \frac{x_1}{y_1}}{\frac{x_3}{y_3} - \frac{x_2}{y_2}} : \frac{\frac{x_4}{y_4} - \frac{x_1}{y_1}}{\frac{x_4}{y_4} - \frac{x_2}{y_2}} = \frac{(x_3y_1 - x_1y_3)/y_1y_3}{x_3y_2 - x_2y_3/y_3y_2} : \frac{(x_4y_1 - x_1y_4)/y_4y_1}{(x_4y_2 - x_2y_4)/y_4y_2}$$

la razón doble se puede escribir como

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \frac{\begin{vmatrix} x_3 & x_1 \\ y_3 & y_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_3 & x_2 \\ y_3 & y_2 \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} x_4 & x_1 \\ y_4 & y_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_4 & x_2 \\ y_4 & y_2 \end{vmatrix}} \quad (5.5)$$

Observemos que, como los puntos son distintos las columnas de los determinantes no son proporcionales y, por tanto, ningún determinante es nulo. ◇

Con esta definición el lema se traduce en que toda homografía de una recta proyectiva en sí misma, que lleve cuatro puntos diferentes cualesquiera en otros cuatro, mantiene invariante la razón doble. Consecuencia de este resultado es el corolario siguiente.

Corolario 5.1.3. Dada una homografía de la recta en sí misma y dados cuatro puntos distintos cualesquiera $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, se cumple

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \{h(p_1), h(p_2); h(p_3), h(p_4)\} \quad (5.6)$$

Demostración. Dado que $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ son distintos y una homografía es una aplicación proyectiva inyectiva, los puntos $\{h(p_1), h(p_2), h(p_3), h(p_4)\}$ son distintos.

Por otro lado, denotando $p_i = (x_i : y_i)$ y $h(p_i) = (x'_i : y'_i)$ y teniendo en cuenta que toda homografía se puede describir con la relación

$$\theta' = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} \text{ } ad - bc \neq 0$$

para determinados a, b, c y d , donde $\theta = \frac{x_i}{y_i}$ y $\theta' = \frac{x'_i}{y'_i}$, es obvio que $h(\theta_i) = h(\frac{x_i}{y_i}) = \frac{x'_i}{y'_i} = \theta'_i$ para todo $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. Del lema anterior se deduce que

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \{h(p_1), h(p_2); h(p_3), h(p_4)\}$$

■

Observación 5.1.3. Observamos que la razón doble está bien definida, es decir, que no depende de la referencia elegida. En efecto, dada otra referencia \mathfrak{R}' de la recta sabemos que existe una única homografía que transforma la referencia inicial en \mathfrak{R}' , y, por tanto, relaciona la coordenada θ respecto a la referencia inicial y la coordenada θ' respecto a \mathfrak{R}' . Al ser una homografía de la recta en sí misma la razón doble de sus imágenes, razón doble respecto a \mathfrak{R}' , es igual a la razón doble respecto a la referencia inicial. ◇

Hasta ahora hemos establecido varias relaciones entre las homografías y la razón doble. Hemos visto que, no solo las homografía de una recta proyectiva en sí misma que transforma cuatro puntos distintos cualesquiera en otros cuatro conserva la razón doble, sino todas las homografías de una recta proyectiva en sí misma. El recíproco de ambos también es cierto. Sin embargo, en vez de demostrarlo para este caso particular, generalicemos los resultados a homografías de una recta proyectiva $\mathbb{P}(E)$ a otra recta $\mathbb{P}(E')$.

5.2. Propiedades

La razón doble ha sido descrita respecto a una referencia \mathfrak{R} arbitraria de la recta proyectiva, por lo que esta puede ser calculada respecto a cualquier referencia. Si dados cuatro puntos distintos $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ de $\mathbb{P}(E)$ tomamos como referencia de la recta $\mathfrak{R} = \{p_1, p_2, p_3\}$, lo cual es posible al ser diferentes, entonces las coordenadas homogéneas de los cuatro puntos pasan a ser

$$\{(1 : 0), (0 : 1), (1 : 1), (\alpha : \beta)\}$$

donde $(\alpha : \beta)$ son las coordenadas homogéneas de p_4 respecto a la referencia. Si calculamos la razón doble obtendríamos que

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \{(1 : 0), (0 : 1); (1 : 1), (\alpha : \beta)\} = \{\infty, 0; 1, \frac{\alpha}{\beta}\} = \frac{\alpha}{\beta} \quad (5.7)$$

Surge así una nueva definición de razón doble.

Definición 5.2.1. (Razón doble) La razón doble de cuatro puntos distintos de una recta proyectiva es la coordenada no homogénea del cuarto punto respecto a la referencia formada por los tres primeros.

Una vez dada esta definición podemos generalizar los resultados obtenidos en el apartado anterior. Para ello hagamos antes una pequeña observación.

Observación 5.2.1. Sea $g : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ la única homografía que transforma $\mathfrak{R} = \{a, b, c\}$ en $\mathfrak{R}' = \{a', b', c'\}$. Sea un punto $p \in \mathbb{P}(E)$ cuyas coordenadas respecto a la referencia \mathfrak{R} son $p = (\alpha : \beta)_{\mathfrak{R}}$. Indicaremos un vector representante de un punto q por \vec{q} . Entonces, teniendo en cuenta que \hat{g} es lineal, se tiene que

$$g(p) = [\hat{g}(\vec{p})] = [\hat{g}(\alpha\vec{a} + \beta\vec{b})] = [\alpha\hat{g}(\vec{a}) + \beta\hat{g}(\vec{b})] = [\alpha\vec{a}' + \beta\vec{b}'] = (\alpha : \beta)_{\mathfrak{R}'}$$

Por tanto, las coordenadas de p respecto a la referencia \mathfrak{R} son las mismas que las coordenadas de $g(p)$ respecto a \mathfrak{R}' . ◇

Teorema 5.2.1. Sean $\mathbb{P}(E)$ y $\mathbb{P}(E')$ dos rectas proyectivas, a, b, c, d puntos distintos de $\mathbb{P}(E)$ y a', b', c', d' puntos distintos de $\mathbb{P}(E')$. Entonces, existe una homografía $h : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ que transforma los puntos a, b, c, d en los puntos a', b', c', d' respectivamente si y solo si

$$\{a, b; c, d\} = \{a', b'; c', d'\}$$

Demostración. Tomamos como referencia de $\mathbb{P}(E)$ los puntos $\mathfrak{R} = \{a, b, c\}$ y como referencia de $\mathbb{P}(E')$ los puntos $\mathfrak{R}' = \{a', b', c'\}$. Sean $\rho(d)$ las coordenadas de d respecto a \mathfrak{R} y $\rho'(d')$ las coordenadas de d' respecto a \mathfrak{R}' . Por la definición anterior de razón doble sabemos que

$$\{a, b, c, d\} = \rho(d) \quad y \quad \{a', b', c', d'\} = \rho'(d')$$

Sea $g : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ la única homografía que transforma \mathfrak{R} en \mathfrak{R}' . Entonces, por la observación 5.2.1, las coordenadas de d respecto a \mathfrak{R} son las mismas que las coordenadas de $g(d)$ respecto a \mathfrak{R}' . Siguiendo nuestra notación $\rho(d) = \rho'(g(d))$.

\Rightarrow Supongamos que existe una homografía $h : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ que transforma los puntos a, b, c, d en los puntos a', b', c', d' respectivamente. Entonces $\rho'(d') = \rho'(h(d))$. Dado que g es única y h transforma a en a' , b en b' y c en c' , es decir \mathfrak{R} en \mathfrak{R}' , se tiene que $h = g$. Con ello $\rho'(d') = \rho'(h(d)) = \rho'(g(d)) = \rho(d)$, dándose así la igualdad de razones dobles.

\Leftarrow Supongamos que se da la igualdad de razones dobles. Entonces $\rho'(d') = \rho(d) = \rho'(g(d))$. Por tanto, las coordenadas de d' respecto a \mathfrak{R}' son las mismas que las coordenadas de $g(d)$ respecto a la misma referencia. Esto implica que $g(d) = d'$, con lo que g es la homografía h que buscábamos. ■

Observemos que en la demostración hemos concluido que $h = g$. Esto nos permite reenunciar el teorema de la siguiente forma.

Teorema 5.2.1 Sea $h : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ la única homografía que transforma a, b, c en a', b', c' . Entonces

$$h(d) = d' \Leftrightarrow \{a, b, c, d\} = \{a', b', c', d'\}. \quad (5.8)$$

Corolario 5.2.2. Las homografías de rectas proyectivas son las biyecciones que conservan la razón doble.

Demostración. Demostremos primero que dada una homografía de rectas proyectivas, esta preserva la razón doble.

Sea $h : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ una homografía de rectas proyectivas y denotemos $h(a) = a'$, $h(b) = b'$, $h(c) = c'$. Es obvio que acabamos de construir la única homografía que transforma a, b, c en a', b', c' . Tomando $d' = h(d)$, por el teorema anterior, se tiene que $\{a, b, c, d\} = \{a', b', c', d'\}$.

Demostremos el recíproco. Dada $g : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ biyección que conserva la razón doble, denotamos $g(a) = a'$, $g(b) = b'$, $g(c) = c'$. Sea por otro lado $h : \mathbb{P}(E) \rightarrow \mathbb{P}(E')$ la única homografía de rectas que transforma a, b, c en a', b', c' . Como g conserva la razón doble, si denotamos $g(d) = d'$ se tiene que $\{a, b, c, d\} = \{g(a), g(b), g(c), g(d)\} = \{a', b', c', d'\}$. Por tanto, aplicando el teorema anterior esto implica que $h(d) = d' = g(d)$. Como d es arbitrario, se tiene que $h = g$, con lo cual g es homografía de rectas. ■

Como se puede observar en la demostración, la razón doble nos permite definir homografías. Veamos un ejemplo para que esto quede claro.

Ejemplo 5.2.1. Encontrar una homografía $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ tal que

$$\begin{array}{lll} h : & 0 & \rightarrow \infty \\ & 1 & \rightarrow -1 \\ & -1 & \rightarrow 0 \end{array}$$

Se tiene que h es la única homografía que lleva el 0 al ∞ , el 1 al -1 y el -1 al 0. Nótese que se puede enunciar el teorema anterior con las coordenadas no homogéneas de los puntos sin problema alguno. Por tanto podemos aplicar el corolario, según el cual h , al ser una homografía de rectas proyectivas, conserva la razón doble, es decir

$$\{0, 1, -1, \theta\} = \{h(0), h(1), h(-1), h(\theta) = \theta'\} = \{\infty, -1, 0, \theta'\}$$

Desarrollando las razones dobles

$$\frac{0+1}{0-\theta} : \frac{0-\theta}{1-\theta} = \frac{\infty-0}{-1-0} : \frac{\infty-\theta'}{-1-\theta'}$$

Dado que h es una homografía de \mathbb{P}^1 en \mathbb{P}^1 , basta encontrar la transformación de Möbius para describirla por completo, es decir la relación entre θ y θ' . Para ello operamos y despejamos, obteniendo

$$\theta' = \frac{-\theta-1}{2\theta}$$

Por tanto, la homografía h tal que $\theta' = \frac{-\theta-1}{2\theta}$ es la homografía pedida. \diamond

5.3. Simetrías de la razón doble

La razón doble ha sido descrita como un cociente de parámetros no homogéneos ordenados de la siguiente manera $\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\}$. Cabe preguntarse si las 24 posibles permutaciones de las coordenadas θ_i darán la misma razón doble.

A continuación se dará el valor de la razón doble resultante de permutar las coordenadas no homogéneas, respecto a $\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\}$. Dado que para probar dichos resultados basta con aplicar la definición de razón doble, desarrollar el cociente y simplificar, no se harán las demostraciones.

Dada la razón doble $\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\}$, se tiene que:

- Permutar la primera y la segunda componente por un lado, y la tercera y la cuarta por otro, mantiene invariante la razón doble:

$$\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\} = \{\theta_2, \theta_1; \theta_4, \theta_3\}$$

- Permutar el par θ_1, θ_2 con el par θ_3, θ_4 , mantiene invariante la razón doble:

$$\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\} = \{\theta_3, \theta_4; \theta_1, \theta_2\}$$

- Si $\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\} = \lambda$, entonces:

$$\begin{aligned} \{\theta_1, \theta_3; \theta_2, \theta_4\} &= 1 - \lambda \\ \{\theta_2, \theta_1; \theta_3, \theta_4\} &= \frac{1}{\lambda} \\ \{\theta_2, \theta_3; \theta_1, \theta_4\} &= 1 - \frac{1}{\lambda} \\ \{\theta_3, \theta_1; \theta_2, \theta_4\} &= \frac{1}{1 - \lambda} \\ \{\theta_3, \theta_2; \theta_1, \theta_4\} &= \frac{\lambda}{1 - \lambda} \end{aligned}$$

Esto nos da las 24 reordenaciones posibles. Resulta entonces que si $\{\theta_1, \theta_2; \theta_3, \theta_4\} = \lambda$, los valores que aparecen al efectuar todas las permutaciones son

$$\rho, 1 - \lambda, \frac{1}{\lambda}, 1 - \frac{1}{\lambda}, \frac{1}{1 - \lambda}, \frac{\lambda}{1 - \lambda}$$

Definición 5.3.1 (Cuaterna armónica). Diremos que p_1, p_2, p_3, p_4 es una *cuaterna armónica*, o que el par p_1, p_2 separa armónicamente al par p_3, p_4 , si su razón doble es -1 .

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = -1 \tag{5.9}$$

Si cuatro puntos de una recta proyectiva son una cuaterna armónica, entonces es posible hacer la siguiente construcción geométrica, donde $p_1 p_{\text{arbitrario}}$, $p_2 p_{\text{arbitrario}}$ y $p_1 p_{\text{arbitrario}1}$ son rectas arbitrarias, por tanto también lo son los puntos $p_{\text{arbitrario}}$ y $p_{\text{arbitrario}1}$.

El recíproco también es cierto, como se muestra en la siguiente proposición.

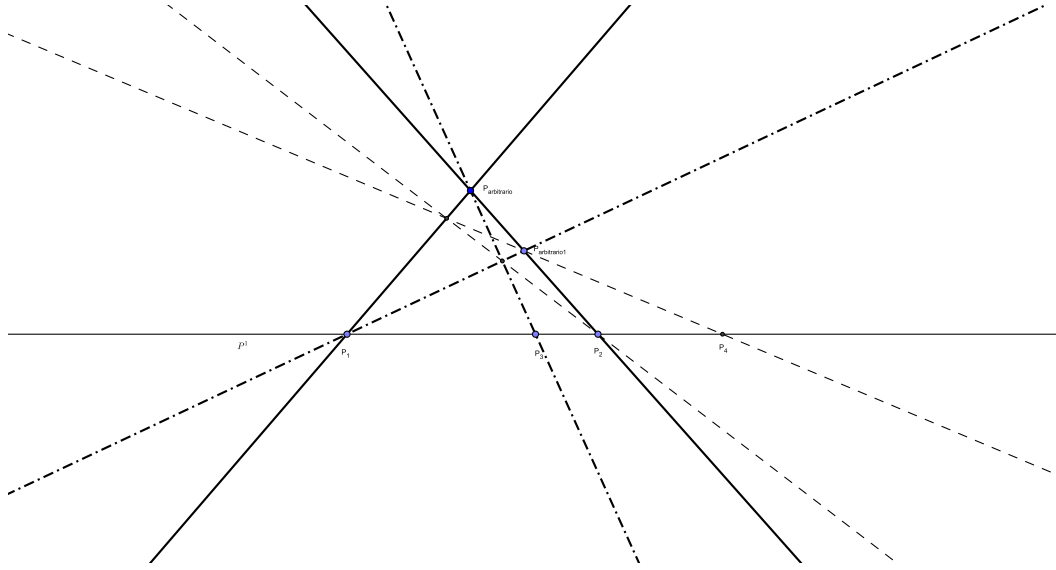


Figura 5.1: Cuaterna armónica

Proposición 5.3.1. *Dada la construcción geométrica mostrada en la figura 5.1, se tiene que $\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = -1$.*

Demostración. Tomamos como referencia los puntos $p_1, p_2, p_{arbitrario}$ y el punto de corte de las rectas $p_1 p_{arbitrario1}$ y $p_3 p_{arbitrario}$, que denotaremos E . Esto es posible ya que, como se observa en la figura, son proyectivamente independientes.

$$\mathfrak{R} = \{p_1, p_2, p_{arbitrario}; E\}$$

Debemos entonces expresar los puntos p_1, p_2, p_3 y p_4 respecto a esta referencia. Los primeros son sencillos, $p_1 = (1 : 0 : 0)$ y $p_2 = (0 : 1 : 0)$.

Por otro lado, p_3 es la intersección de las rectas $E p_{arbitrario}$ y $p_1 p_2$. Estas pueden ser descritas por las ecuaciones

$$E p_{arbitrario} := [\alpha(1, 1, 1) + \beta(0, 0, 1) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}] = (1 : 1 : 1 + \theta) \cup \{p_{arbitrario}\} \mid \theta \in \mathbb{R}$$

$$p_1 p_2 : z = 0$$

siendo por tanto el punto de corte

$$p_3 = (1 : 1 : 0)$$

De la misma forma podemos calcular p_4 como la intersección de las rectas $p_1 p_2$ y $D p_{arbitrario1}$, donde D es el punto de corte de las rectas $p_1 p_{arbitrario}$ y $p_2 E$. Por tanto, para calcular las coordenadas de p_4 respecto a la referencia \mathfrak{R} , primero debemos obtener las de D y las de $p_{arbitrario1}$.

Comencemos con D . Las rectas de las cuales es intersección pueden describirse a través de

$$p_2 E : [\alpha(1, 1, 1) + \beta(0, 1, 0) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}] = (1 : 1 + \theta : 1) \cup \{p_2\} \mid \theta \in \mathbb{R}$$

$$p_1 p_{arbitrario} : y = 0$$

por lo que el punto buscado es

$$D = (1 : 0 : 1)$$

Para calcular $p_{arbitrario1}$ tenemos que las rectas correspondientes vienen dadas por

$$p_1 E : [\alpha(1, 1, 1) + \beta(1, 0, 0) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}] = (1 + \theta : 1 : 1) \cup \{p_1\} \mid \theta \in \mathbb{R}$$

$$p_2 p_{arbitrario} : x = 0$$

siendo el punto de corte

$$p_{\text{arbitrario1}} = (0 : 1 : 1)$$

Podemos ya calcular las coordenadas de p_4 como la intersección de

$$Dp_{\text{arbitrario1}} : [\alpha(1, 0, 1) + \beta(0, 1, 1) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}] = (1 : \theta : 1 + \theta) \cup \{p_{\text{arbitrario1}}\} \mid \theta \in \mathbb{R}$$

$$p_1 p_2 : z = 0$$

Con ello obtenemos que

$$p_4 = (1 : -1 : 0)$$

Una vez hecho esto basta comprobar que la razón doble de p_1, p_2, p_3 y p_4 es -1 . Para ello haremos uso de resultados del apartado de cálculo de razones dobles, ya que de momento no hemos visto como calcular la razón doble de puntos que no pertenecen a una recta proyectiva, como es el caso.

Entonces, como veremos más adelante

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \{(1 : 0 : 0), (0 : 1 : 0); (1 : 1 : 0), (1 : -1 : 0)\} = \{\infty, 0; 1, -1\} = -1 \quad (5.10)$$

■

Dado que en esta construcción las rectas $p_1 p_{\text{arbitrario}}$, $p_2 p_{\text{arbitrario}}$ y $p_1 p_{\text{arbitrario1}}$ y los puntos $p_{\text{arbitrario}}$ y $p_{\text{arbitrario1}}$ son arbitrarios, elijamos los que elijamos vamos a obtener siempre el mismo punto p_4 .

El orden de la cuaterna armónica es relativamente importante ya que, aunque algunas permutaciones cambian su valor, las reordenaciones

$$\{p_2, p_1; p_4, p_3\} \quad , \quad \{p_3, p_4; p_1, p_2\} \quad , \quad \{p_2, p_1; p_3, p_4\}$$

siguen dando como resultado -1 .

Es importante mencionar varias cosas acerca de esta construcción. El punto p_3 está entre el punto p_1 y el punto medio entre p_1 y p_2 si y solo si el punto p_4 está a la izquierda de p_1 . Por el contrario, p_3 está entre el punto medio y el punto p_2 si y solo si el punto p_4 está a la derecha de p_2 . Si el punto p_3 no está entre p_1 y p_2 , entonces lo estará p_4 . Por último, p_3 está en el punto medio si y solo si p_4 está en el infinito. Esto significa que la recta $p_4 p_{\text{arbitrario1}}$ es paralela a la recta donde se encuentran los puntos.

Observemos que si, al calcular la razón doble tomamos como referencia los puntos p_1, p_2, p_3 , entonces, necesariamente, $\theta_4 = -1$.

$$\{p_1, p_2; p_3, p_4\} = \{\infty, 0; 1, -1\} = -1$$

Capítulo 6

Clasificación de homografías

Realizaremos la clasificación de las homografías a partir de sus variedades invariantes. Comenzaremos con las homografías de \mathbb{P}^1 , clasificándolas según sus puntos fijos. Relacionaremos esto con las formas canónicas de Jordan y haremos hincapié en algunas homografías importantes, como son las involuciones.

6.1. Clasificación de homografías de \mathbb{P}^1 . Puntos fijos

En esta sección haremos una primera aproximación intuitiva a los puntos fijos de una homografía de \mathbb{P}^1 , para después enlazarlo con las formas canónicas de Jordan.

Recordemos que podíamos expresar una homografía de \mathbb{P}^1 como

$$\theta' = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} \quad (6.1)$$

donde $ad - bc \neq 0$. Podemos remover un poco las cosas en la ecuación anterior

$$\theta'(c\theta + d) = a\theta + b \Leftrightarrow c\theta\theta' - a\theta + d\theta' - b = 0 \quad (6.2)$$

y obtenemos que es equivalente a

$$\alpha\theta\theta' + \beta\theta + \gamma\theta' + \delta = 0 \quad (6.3)$$

donde $\alpha = c$, $\beta = -a$, $\gamma = d$, $\delta = -b$, denominada *ecuación general o implícita* de la homografía.

Que una homografía, distinta de la identidad, mantenga invariante un punto (x, y) implica que $(x', y') = (x, y)$, y con ello $\theta' = \theta$. Sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos una ecuación de segundo grado, y, por tanto, tendrá dos soluciones distintas o una solución doble. Esto quiere decir que, suponiendo que $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, las homografías, exceptuando la identidad, tienen dos puntos fijos distintos o un punto fijo doble, dependiendo de la ecuación resultante.

$$\alpha\theta^2 + (\beta + \gamma)\theta + \delta = 0 \quad (6.4)$$

Veamos en cada uno de los casos cual es la expresión de la homografía que tiene esos puntos fijos, basándonos en la ecuación anterior.

6.1.1. Dos puntos fijos distintos

Sea h una homografía de \mathbb{P}^1 con dos puntos fijos M y N distintos. Tratamos de encontrar el valor de los parámetros $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ para poder describir las homografías de este tipo. Como sabemos que M y N son puntos fijos, sus coordenadas no homogéneas deben cumplir la ecuación (6.4). Por tanto una forma de hallar estos parámetros sería sustituir las coordenadas no homogéneas de los puntos fijos en dicha ecuación y ver para que valores de $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ se cumple.

Para facilitar este cálculo tomamos la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N; E\}$, donde E es un punto cualquiera distinto de M y N . En esta referencia las coordenadas no homogéneas de M y N son ∞ y

0, respectivamente. Por tanto la ecuación (6.4) admite como soluciones 0 y ∞ . Sustituyendo estos valores en la ecuación obtenemos que

$$\alpha 0 + (\beta + \gamma)0 + \delta = 0 \Leftrightarrow \delta = 0$$

Hagamos el cálculo para ∞ con más cuidado. Sustituyendo las coordenadas no homogéneas por las coordenadas homogéneas en la ecuación (6.3), esta queda

$$\alpha x x' + \beta x y' + \gamma x' y + \delta y y' = 0 \quad (6.5)$$

Dado que estamos con puntos fijos imponemos que $(x', y') = (x, y)$ y que $\delta = 0$, pues lo hemos hallado antes

$$\alpha x^2 + \beta x y + \gamma x y = 0$$

Las coordenadas homogéneas de M respecto a la referencia \mathfrak{R} son $(1 : 0)$. Sustituyéndolas en la ecuación anterior obtenemos que

$$\alpha 1 + \beta 0 + \gamma 0 = 0 \Leftrightarrow \alpha = 0$$

Por tanto, en una homografía de \mathbb{P}^1 con dos puntos fijos se tiene que $\alpha = c = 0$ y $\delta = -b = 0$. Entonces, la *ecuación canónica* de la homografía respecto a la referencia \mathfrak{R} tomada es

$$\theta' = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} = \frac{a}{d}\theta = k\theta \quad (6.6)$$

donde la constante k se llama *módulo* de la homografía. Notemos que dada cualquier homografía que tenga dos puntos fijos distintos, tomando la referencia adecuada, podemos decir que dichos puntos fijos son el cero y el infinito.

Observación 6.1.1. El cálculo para el punto M , cuya coordenada no homogénea era ∞ , puede hacerse sin tener tanto cuidado, gracias a que hemos comprobado rigurosamente que funciona.

$$\alpha \theta^2 + (\beta + \gamma)\theta + \delta = 0 \Rightarrow \alpha + (\beta + \gamma)\frac{1}{\theta} + \delta\frac{1}{\theta^2} = 0$$

$$\alpha + (\beta + \gamma)\frac{1}{\infty} + \delta\frac{1}{\infty^2} = 0 \Leftrightarrow \alpha = 0$$

◇

Es importante observar que, aunque la ecuación $\theta' = k\theta$ se denomina canónica, en realidad no lo es mucho, ya que esta expresión se ha obtenido tomando la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N; E\}$. Notemos que si, en vez de tomar como referencia \mathfrak{R} , tomamos $\overline{\mathfrak{R}} = \{N, M; E\}$ la ecuación cambia.

En efecto, el cambio de \mathfrak{R} a $\overline{\mathfrak{R}}$ viene dado por la homografía que transforma $(1 : 0)$ en $(0 : 1)$ y $(0 : 1)$ en $(1 : 0)$. Sustituyendo estas transformaciones, en coordenadas no homogéneas, en la ecuación (6.1), obtenemos que la ecuación de la homografía que transforma \mathfrak{R} en $\overline{\mathfrak{R}}$ es

$$\bar{\theta} = \frac{b}{c\theta} = \frac{\lambda}{\theta}$$

Por tanto, la ecuación $\theta' = k\theta$ respecto a la referencia $\overline{\mathfrak{R}}$, que se obtiene despejando en la ecuación anterior θ en función de $\bar{\theta}$ y sustituyendo, es

$$\frac{\lambda}{\bar{\theta}'} = k \frac{\lambda}{\bar{\theta}} \Leftrightarrow \bar{\theta}' = \frac{1}{k} \bar{\theta}$$

por lo que en este caso el módulo de la homografía con puntos fijos M y N sería $1/k$.

Podríamos preguntarnos entonces porque darle el apellido canónico. Aunque una permutación de los puntos M y N en la referencia nos da un valor del módulo de la homografía distinto, el parámetro k está geoméricamente asociado a la homografía, cosa que veremos no ocurrirá con parámetros posteriores. Es decir, solo depende de la homografía y del orden de los puntos M y N

en la referencia, que según sea obtendremos k o $1/k$. Observemos que no depende del punto unidad E que hayamos tomado. Por tanto la ecuación

$$\theta' = k\theta \quad (6.7)$$

puede considerarse canónica.

El parámetro k puede ser hallado a través de la razón doble, ya que estamos tratando homografías. En efecto, dada una homografía h que deja fijos los puntos M y N , y por tanto en la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N; E\}$ viene descrita por la ecuación (6.7) para cierto k , se tiene que

$$\{M, N, P, h(P)\} = \{\infty, 0, \theta, \theta' = k\theta\} = k \quad (6.8)$$

para un punto P cualquiera independientemente de E . Si permutamos los puntos M y N , por la simetría de la razón doble se tiene que

$$\{N, M, P, h(P)\} = \frac{1}{k} \quad (6.9)$$

independientemente de E . Esto nos demuestra de nuevo que el módulo depende solo de la homografía y del orden de los puntos fijos.

Hagamos un pequeño inciso que retomaremos más adelante. Si escribimos, en la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N, E\}$, la matriz asociada a una homografía h que tiene dos puntos fijos M y N obtenemos

$$\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & d \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \frac{a}{d} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, hemos encontrado una referencia en la cual la homografía h es diagonal.

6.1.2. Un punto fijo doble

Veamos ahora que ecuación describe a una homografía h de \mathbb{P}^1 que deja fijo un solo punto. Si M es el punto fijo de h , entonces la ecuación (6.4) debe admitir como solución la coordenada no homogénea de M . Por tanto, procederemos como en el caso anterior. Tomaremos una referencia adecuada y sustituiremos la coordenada no homogénea de M , respecto a dicha referencia, en la ecuación (6.4) para hallar los parámetros $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

Dado que solo hay un punto fijo, tomamos como referencia $\mathfrak{R} = \{M, X; E\}$, donde X y E son puntos diferentes y distintos de M . En esta referencia la coordenada no homogénea de M es ∞ . Por tanto, para cualquier homografía con un punto fijo doble, tomando la referencia adecuada, se puede decir que dicha homografía deja fijo el infinito. Dado que ya justificamos anteriormente los cálculos con ∞ esta vez lo haremos sin tener cuidado. Recordemos que podíamos escribir

$$\alpha\theta^2 + (\beta + \gamma)\theta + \delta = 0 \Rightarrow \alpha + (\beta + \gamma)\frac{1}{\theta} + \delta\frac{1}{\theta^2} = 0$$

$$\alpha + (\beta + \gamma)\frac{1}{\infty} + \delta\frac{1}{\infty^2} = 0 \Leftrightarrow \alpha = 0$$

Por tanto la ecuación que describe los puntos fijos de la homografía pasa a ser

$$(\beta + \gamma)\theta + \delta = 0$$

Dado que el punto M es solución doble de la ecuación de segundo grado (6.4), si volvemos a sustituir su coordenada no homogénea en la ecuación anterior, esta debe cumplirse. Por tanto

$$(\beta + \gamma)\theta + \delta = 0 \Rightarrow (\beta + \gamma) + \delta\frac{1}{\theta} = 0$$

$$(\beta + \gamma) + \delta\frac{1}{\infty} = 0 \Leftrightarrow \beta = -\gamma$$

Por tanto, en una homografía de \mathbb{P}^1 con un punto fijo doble se tiene que $\alpha = c = 0$ y $-a = \beta = -\gamma = -d$. Entonces, la ecuación “canónica” de la homografía, respecto a la referencia \mathfrak{R} tomada, es

$$\theta' = \frac{a\theta + b}{c\theta + d} = \frac{a\theta + b}{a} = \theta + \mu \quad (6.10)$$

A este tipo de homografías de las denomina *elaciones* y se dice que dejan fijo el infinito, pues, como hemos visto antes, tomando la referencia adecuada el punto fijo M pasa a ser ∞ .

Notemos que esta vez el apellido canónico no es merecido, al contrario que en el caso anterior, pues el parámetro μ no está geoméricamente asociado a la homografía.

Veámoslo. Partiendo de la referencia $\mathfrak{R} = \{M, X; E\}$, realizamos un cambio de coordenadas que lleve el infinito al infinito, por ejemplo aplicando una homografía con ecuación

$$\bar{\theta} = \frac{1}{k}\theta$$

es decir, una homografía h que en esa referencia deje fijos el cero y el infinito. Por tanto, estamos pasando de la referencia \mathfrak{R} a la referencia $\bar{\mathfrak{R}} = \{M, X; h(E)\}$.

La ecuación $\theta' = \theta + \mu$ respecto a la referencia $\bar{\mathfrak{R}}$, que se obtiene despejando en la ecuación anterior θ en función de $\bar{\theta}$ y sustituyendo, es

$$k\bar{\theta}' = k\bar{\theta} + \mu \Leftrightarrow \bar{\theta}' = \bar{\theta} + \frac{\mu}{k}$$

Si $k = \mu$ entonces la ecuación de una homografía cuyo punto fijo es M respecto a la referencia $\bar{\mathfrak{R}}$ es

$$\bar{\theta}' = \bar{\theta} + 1$$

Como se puede observar, el parámetro μ no está asociado a la homografía, pues lo hemos eliminado de la ecuación que la define. Por tanto, la ecuación $\theta' = \theta + \mu$ no se puede considerar canónica. Lo máximo a lo que podemos aspirar es a expresar la ecuación de una elación como $\theta' = \theta + 1$, tomando la referencia adecuada.

De nuevo, hagamos un inciso que retomaremos más adelante. Dada una homografía h que tiene un punto fijo doble M , si escribimos, en la referencia \mathfrak{R} en la cual la ecuación que la define es $\theta' = \theta + 1$ (y por tanto $b = a$), su matriz asociada obtenemos

$$\begin{pmatrix} a & a \\ 0 & a \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, hemos encontrado una referencia en la cual la matriz de la homografía h se encuentra en su forma canónica de Jordan, salvo múltiplo.

6.2. Formas canónicas de Jordan y puntos fijos

Hemos anticipado que existe cierta relación entre los puntos fijos de una homografía y la forma canónica de Jordan de su matriz asociada. En este apartado explicaremos cual es esa relación.

Sea h una homografía distinta de la identidad. Si un punto $[v]$ es punto fijo de la homografía, entonces

$$[\hat{h}(v)] = h([v]) = [v] \Leftrightarrow \hat{h}(v) = \rho v \quad (6.11)$$

para cierto ρ , de lo cual se deduce que v es autovector de la aplicación lineal \hat{h} con autovalor asociado ρ . Por tanto un punto x es punto fijo de la homografía si y solo si es un autovector de la aplicación lineal \hat{h} , asociado a un autovalor no nulo.

Antes de continuar hagamos un pequeño recordatorio.

Observación 6.2.1. Dada un endomorfismo \hat{h} de E ($\dim(E) = n$) y sean λ_i , con $i = 1, \dots, r$, sus distintos autovalores, se llama subespacio propio asociado a λ_i al subespacio vectorial V_{λ_i} formado por todos los autovectores asociados a dicho autovalor:

$$V_{\lambda_i} := \{u \in E \mid \hat{h}(u) = \lambda_i u\} \quad (6.12)$$

Se verifica que

$$V_{\lambda_i} = \text{Ker}(\hat{h} - \lambda_i I) ; \quad \dim(V_{\lambda_i}) = n - \text{rg}(A - \lambda_i I) \quad (6.13)$$

donde A es la matriz asociada a \hat{h} .

La dimensión de V_{λ_i} , denotada por d_i se denomina multiplicidad geométrica. Por otro lado, la multiplicidad de λ_i como raíz del polinomio característico se denomina multiplicidad algebraica, y se denota por α_i . Si $\alpha_i + \dots + \alpha_r = n$ y $d_i = \alpha_i$ para cada $i = 1, \dots, r$, entonces \hat{h} es diagonalizable. En el caso en el que solo se cumpla que $\alpha_i + \dots + \alpha_r = n$ el endomorfismo será “Jordanizable”. \diamond

Sabemos pues que u es autovector de \hat{h} asociado a un autovalor λ no nulo si y solo si $[u]$ es punto fijo. Por tanto, como V_λ está formado por todos los autovectores asociados a λ , se tiene que $\mathbb{P}(V_\lambda)$ es una variedad proyectiva formada por puntos fijos de h . Además, el conjunto de las proyecciones de los subespacios propios asociados a los distintos autovalores de \hat{h} nos proporcionan todos los puntos fijos de h .

Notemos que hasta ahora no hemos utilizado en absoluto que h sea una homografía de \mathbb{P}^1 . Con esto queremos resaltar que todo lo dicho es válido para homografías de \mathbb{P}^n . Es decir, los puntos fijos de una homografía de \mathbb{P}^n vienen dados por $\mathbb{P}(V_{\lambda_i})$ para los distintos autovalores λ_i de la aplicación lineal asociada.

Observación 6.2.2. Cualquier homografía de un espacio proyectivo complejo tiene puntos fijos. Sin embargo, hay homografías del espacio proyectivo real que no los tienen. Podemos precisar un poco más, ya que sabemos que todo polinomio con coeficientes en \mathbb{R} de grado impar tiene raíces. Por tanto para que haya homografías sin puntos fijos, el grado del polinomio debe ser par, con lo cual la dimensión del espacio vectorial es par y, por tanto, la dimensión del espacio proyectivo debe ser impar. \diamond

Indaguemos un poco más para obtener las conclusiones del apartado anterior, es decir, que una homografía h de \mathbb{P}^1 distinta de la identidad tiene o dos puntos fijos distintos o uno doble. Para ello trabajemos con matrices.

Sea A la matriz asociada a la homografía h , que no es más que la matriz asociada a la aplicación lineal \hat{h} , y x un punto fijo de h . Entonces $\rho x = Ax$, con lo cual se obtiene el sistema $(A - \rho I)x = 0$, que tiene solución no idénticamente nula si y solo si $\det(A - \rho I) = 0$. Este determinante no es otro que el polinomio característico, cuyas raíces, ρ , son los autovalores de la aplicación lineal \hat{h} . Dado que nos encontramos en \mathbb{P}^1 , la matriz A será una matriz 2×2 , y por tanto el polinomio característico será un polinomio de segundo grado. Esto implica que tendrá dos soluciones distintas o una solución doble, siempre que el cuerpo sobre el que estemos trabajando se \mathbb{C} . Por tanto la aplicación lineal \hat{h} tendrá un autovalor o dos distintos. Evaluemos cada caso.

Si \hat{h} tiene dos autovalores distintos, entonces $\dim(V_{\rho_i}) = 1$. Por tanto las variedades proyectivas $\mathbb{P}(V_{\rho_1})$ y $\mathbb{P}(V_{\rho_2})$ tienen dimensión cero, por lo que son puntos. Esto da lugar a dos puntos fijos distintos en la homografía. Además si escribimos la matriz A en la base formada por estos dos autovectores obtendremos una matriz diagonal, como habíamos visto antes.

Si \hat{h} tiene un solo autovalor ρ , en cuyo caso $\alpha_1 = 2$, en principio pueden darse dos casos.

El caso en el que $\dim(V_\rho) = 2 = d_1$ no es admisible, ya que hemos supuesto que h es distinta de la identidad. Sin embargo, la aplicación \hat{h} con $\dim(V_\rho) = 2$ tiene como autovectores asociados a ρ todo el espacio vectorial, por lo que todos los puntos de \mathbb{P}^1 serían puntos fijos de h .

Si $\dim(V_\rho) = 1 = d_1$ entonces $\mathbb{P}(V_\rho)$ es un punto. En tal caso, la homografía h tendrá un único punto fijo doble. Además, dado que $\alpha_1 = 2 \neq d_1 = 1$, la matriz A no es diagonalizable. Sin embargo, si admite forma canónica de Jordan. Por tanto, en cierta base, a la cual pertenece dicho autovector, la matriz A se encuentra en su forma canónica de Jordan, como vimos anteriormente.

Con todo ello podemos concluir que una homografía de \mathbb{P}^1 , distinta de la identidad, tiene dos puntos fijos distintos o un punto fijo doble. Si escribimos la matriz asociada a la homografía en la base dada por dichos puntos fijos obtendremos, en el primer caso, una matriz diagonal y, en el segundo, su forma canónica de Jordan.

Observación 6.2.3. Sea una homografía h de \mathbb{P}^1 y su aplicación lineal asociada \hat{h} . Un punto $[v]$ de \mathbb{P}^1 pertenece al centro de h si y solo si es un autovector de \hat{h} con autovalor 0.

En efecto, que $[v]$ esté en el centro de h equivale a que $v \in \ker \hat{h}$, es decir, que $\hat{h}(v) = 0 = 0 \cdot v$. \diamond

6.3. Aplicaciones afines

En esta sección y en la que sigue trataremos algunos casos particulares, de gran importancia, de homografías de \mathbb{P}^1 .

Estudiemos las homografía de \mathbb{P}^1 tales que su matriz asociada es

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & d \end{pmatrix}$$

es decir, $c = 0$, y con ello, como d no puede ser cero,

$$\theta' = \frac{a\theta + b}{d} = \alpha\theta + \beta \quad (6.14)$$

donde $\alpha = a/d$ y $\beta = b/d$. Veamos cuales son sus puntos fijos.

Siguiendo lo visto en el apartado anterior, debemos encontrar los autovalores de A y sus autovectores asociados. Realizando unas sencillas cuentas se llega a que los autovalores son a y d . Dado que hay dos autovalores distintos, la homografía h tendrá dos puntos fijos.

Calculemos dos autovectores, u_a y u_d asociados a estos autovalores. Recordemos que, como $V_\lambda = \text{Ker}(\hat{h} - \lambda I)$, si u es un autovector con autovalor λ , entonces $u \in V_\lambda = \text{Ker}(\hat{h} - \lambda I)$, y por tanto $(A - \lambda I)u = 0$. Esto nos proporciona una forma de hallar los autovectores. En nuestro caso

$$(A - aI) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & b \\ 0 & d - a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow y = 0 \Rightarrow u_a = (1, 0)$$

$$(A - dI) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a - d & b \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow y = \frac{a - d}{b}x \Rightarrow u_b = (b, d - a)$$

Por tanto los dos puntos fijos de la homografía h son $(1 : 0)$ y $(b/d : 1 - a/d) = (\beta : 1 - \alpha)$, cuyas coordenadas no homogéneas son ∞ y $\frac{\beta}{1-\alpha}$.

Dado que la ecuación $\theta' = \alpha\theta + \beta$ define una aplicación afín de la recta podemos concluir que las afinidades, homografía con $c = 0$, dejan fijo el infinito.

Observación 6.3.1. No se debe confundir esto con las elaciones. Mientras estás últimas tienen un punto fijo doble, que se puede identificar con el infinito en cierta referencia, las homografías con $c = 0$ dejan fijo el infinito sea cual sea la referencia en la que nos encontramos. Es decir, si cambiamos de referencia seguirán teniendo como punto fijo el punto $(1 : 0)$ de dicha referencia. \diamond

Veamos el recíproco, si una homografía de \mathbb{P}^1 deja fijo el infinito, entonces es una aplicación afín.

Sea una homografía de \mathbb{P}^1 con matriz asociada

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

Si deja fijo el infinito, entonces

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow a = \rho, c = 0$$

Por tanto, la matriz de la homografía, dado que $d \neq 0$, es

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & d \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Si describimos la homografía que deja fijo el infinito a través de la transformación de moebius obtenemos que

$$\theta' = \alpha\theta + \beta$$

es decir, es una transformación afín de la recta.

Estos dos resultados dan lugar al siguiente lema.

Lema 6.3.1. *Dada una homografía de \mathbb{P}^1 y $\mathfrak{R} = \{x_0, x_1; E\}$ una referencia arbitraria, entonces h deja fijo el infinito, es decir deja fijo el punto x_0 , si y solo si $c = 0$, o equivalentemente, si y solo si es una afinidad.*

El calculo de los puntos fijos de la homografía de \mathbb{P}^1 dada al principio de esta sección, aquella cuya matriz asociada es

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & d \end{pmatrix}$$

y que viene descrita a través de la ecuación

$$\theta' = \alpha\theta + \beta$$

podría haberse hecho como se hizo en el primer apartado de este capítulo, cuando aún no conocíamos la relación entre los puntos fijos y los autovectores.

En tal caso, tendríamos que buscar las coordenadas no homogéneas θ que cumplen la ecuación

$$\theta = \alpha\theta - \beta$$

Sin embargo, esta ecuación, dado que es de primer orden, solo tiene una solución, pero sabemos que el ∞ , es decir el $(1 : 0)$, es también punto fijo de h . Por tanto, debe cumplir también la ecuación. Si hacemos la comprobación con las coordenadas no homogéneas obtenemos que

$$\infty = \alpha\infty - \beta = \infty$$

Sin embargo, personalmente, esta comprobación no me deja nada tranquila, dado que es un procedimiento falto de rigor. Por tanto, vamos a comprobarlo de nuevo con las coordenadas homogéneas. En tal caso tenemos la ecuación

$$\frac{x'}{y'} = \alpha \frac{x}{y} - \beta \quad (6.15)$$

$$x'y = \alpha xy' + \beta yy' \quad (6.16)$$

Imponiendo que (x, y) es punto fijo obtenemos

$$xy = \alpha xy + \beta y^2 \Leftrightarrow xy - \alpha xy - \beta y^2 = 0$$

Una simple comprobación nos permite asegurar que el punto $(1 : 0)$ es punto fijo de h

$$1 \cdot 0 - \alpha 1 \cdot 0 + \beta 0 = 0$$

Observación 6.3.2. Si en vez imponer la condición de punto fijo, $(x, y) = (x', y')$, en la ecuación (6.16) lo hacemos en la ecuación (6.15) y luego multiplicamos por y , el punto $(1 : 0)$ solo es solución de la ecuación resultante si $\alpha = 1$, cuando debería serlo para todo α .

$$\frac{x}{y} = \alpha \frac{x}{y} - \beta \Leftrightarrow x = \alpha x + \beta y$$

$$1 = \alpha 1 + \beta 0 = \alpha$$

Esto nos muestra que trabajar con las coordenadas no homogéneas y pasar después a homogéneas tiene sus limitaciones, y siempre que hagamos cálculos de este estilo debemos tener bien claro qué estamos haciendo. \diamond

6.3.1. Aplicaciones afines y homografías de \mathbb{P}^n

El lema 6.3.1 se puede generalizar a una homografía de \mathbb{P}^n . A continuación expondremos y demostraremos dicho resultado.

Proposición 6.3.2. Sea h una homografía de \mathbb{P}^n y $\mathfrak{R} = \{x_0, \dots, x_n; E\}$ una referencia arbitraria. El hiperplano H dado por la ecuación implícita $x_n = 0$ se denomina plano del infinito. Si h deja invariante el plano del infinito entonces es una aplicación afín.

Observación 6.3.3. Que una homografía deje invariante un hiperplano H no significa que deje invariante cada punto del hiperplano, es decir que los puntos de H sean puntos fijos, sino que la imagen de un punto de H pertenece al hiperplano, pero no tiene porque ser el mismo punto. \diamond

Demostración. Sea $h : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P}^n$ una homografía que deja invariante el plano H dado por la ecuación $x_n = 0$. La matriz asociada a dicha aplicación vendrá dada por

$$\begin{pmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n} \\ a_{10} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

para ciertos a_{ij} , con $i, j = 0, \dots, n$. Dado un punto $(x_0 : \dots : x_n)$ su imagen vendrá dada por la clase del vector (x'_0, \dots, x'_n) tal que

$$\begin{pmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n} \\ a_{10} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} x'_0 \\ x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}$$

Los vectores pertenecientes a \hat{H} tienen la forma $(x_0, \dots, x_{n-1}, 0)$. Dado que h deja invariante el hiperplano H debe cumplirse que

$$\begin{pmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n} \\ a_{10} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ 0 \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} x'_0 \\ \vdots \\ x'_{n-1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Por tanto, debe cumplirse la ecuación

$$a_{n0}x_0 + \cdots + a_{nn-1}x_{n-1} + a_{nn} \cdot 0 = \rho \cdot 0 = 0$$

para todo $(x_0, \dots, x_{n-1}) \neq (0, \dots, 0)$. Esto implica que, necesariamente

$$a_{n0} = 0 = a_{n1} = \cdots = a_{nn-1}$$

con lo que la matriz asociada a h adopta la forma

$$\begin{pmatrix} a_{00} & \cdots & a_{0n-1} & a_{0n} \\ a_{10} & \cdots & a_{1n-1} & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Dado que $a_{nn} \neq 0$, pues debe ser invertible, la matriz se puede expresar, usando bloques, como

$$\left(\begin{array}{ccc|c} A & & & b \\ \hline 0 & \cdots & 0 & 1 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc|c} A & & & b \\ \hline 0^t & & & 1 \end{array} \right)$$

Veamos cual es la expresión de una homografía de \mathbb{P}^n con esta matriz asociada. Dado un punto $p = (x_0 : \dots : x_{n-1} : x_n) \notin H$, es decir, tal que $x_n \neq 0$, podemos escribirlo como

$$p = (x_0 : \dots : x_{n-1} : x_n) = \left(\frac{x_0}{x_n} : \cdots : \frac{x_{n-1}}{x_n} : 1 \right) = (X_0 : \cdots : X_{n-1} : 1) = \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix}^t$$

donde $X_i = \frac{x_i}{x_n}$ para $i = 0, \dots, n-1$. Entonces

$$\left(\begin{array}{c|c} A & b \\ \hline 0^t & 1 \end{array} \right) \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AX + b \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X' \\ 1 \end{pmatrix}$$

Con ello, la homografía h que deja fijo el plano del infinito H viene descrita por

$$h : X' = AX + b \quad (6.17)$$

siendo por tanto h una aplicación afín. ■

6.4. Involuciones

En esta sección introduciremos un tipo de homografías, llamadas involuciones, que serán de gran importancia a la hora de estudiar cónicas.

Definición 6.4.1. Dada una homografía h de \mathbb{P}^1 se dice que es una *involución* si $h^2 = id$.

Estudiemos como se caracterizan las involuciones y como describirlas.

Lema 6.4.1. Dada una homografía h de \mathbb{P}^1 distinta de la identidad. Existe un punto $P \in \mathbb{P}^1$ tal que $h(P) \neq P$ y $h^2(P) = P$, si y solo si h es una involución.

Demostración. Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una homografía, distinta de la identidad. Trivialmente, si h es una involución entonces $h^2 = id$, y por tanto para cualquier punto $P \in \mathbb{P}^1$ tal que $h(P) \neq P$ se tiene que $h^2(P) = P$.

Hagamos pues la otra implicación.

Supongamos que existe un punto $P \in \mathbb{P}^1$ que cumple $h(P) \neq P$ y $h^2(P) = P$. Sea $P' = h(P)$, entonces lo anterior es equivalente a que $h(P) = P'$ y $h(P') = P$, con $P' \neq P$.

Tomemos $\mathfrak{R} = \{P, P'; E\}$ como referencia de \mathbb{P}^1 y encontremos la expresión de la ecuación general de la cónica en esta referencia. Notemos que en este referencia las coordenadas del punto P son $(1 : 0)$, mientras que las del punto P' son $(0 : 1)$. Recordemos que la ecuación general en coordenadas homogéneas se podía escribir como

$$\alpha xx' + \beta xy' + \gamma x'y + \delta yy' = 0$$

donde debemos determinar los parámetros α, β, γ y δ . Dado que $h(P) = P'$ el par $(x, y) = (1 : 0)$ y $(x', y') = (0 : 1)$ debe satisfacer la ecuación anterior. Sustituyendo obtenemos que $\beta = 0$. Dado que $h(P') = P$, lo mismo ocurre con el par $(x, y) = (0 : 1)$ y $(x', y') = (1 : 0)$. Sustituyendo se obtiene que $\gamma = 0$. Con ello la ecuación general de la homografía queda

$$\alpha xx' + \delta yy' = 0 \Leftrightarrow \alpha \theta \theta' + \delta = 0 \Leftrightarrow \theta \theta' = \lambda \Leftrightarrow \theta' = \frac{\lambda}{\theta}$$

donde $\lambda = -\delta/\alpha$.

Dado un punto $P_0 \in \mathbb{P}^1$ arbitrario tal que $h(P_0) \neq P_0$, es decir, que no sea un punto fijo de la homografía. Sean θ_0, θ'_0 y θ' las coordenadas no homogéneas de $P_0, h(P_0)$ y $h^2(P_0)$ respectivamente. Entonces

$$\theta'_0 = \frac{\lambda}{\theta_0} \Rightarrow \theta' = \frac{\lambda}{\theta'_0} = \theta_0$$

concluyendo así que $h^2(P_0) = P_0$.

Por tanto, dado cualquier punto Q de \mathbb{P}^1 , distinto de los puntos fijos de h pues para ellos se cumple trivialmente, se tiene que $h^2(Q) = Q$. Con esto se concluye que $h^2 = id$ y, por tanto, h es involución. ■

Esta demostración nos proporciona una información adicional: la ecuación general de una involución respecto a una referencia de la forma $\Re = \{P, h(P); E\}$, donde P no es un punto fijo, es

$$\theta\theta' = \lambda \quad (6.18)$$

Esta ecuación no es canónica pues, como ocurría con el parámetro de las homografías con un punto fijo doble, λ no está geoméricamente asociado a la involución.

Otra característica importante de las involuciones es la siguiente.

Lema 6.4.2. *Sea h una homografía de \mathbb{P}^1 distinta de la identidad y sea A su matriz asociada. Entonces h es una involución si y solo si $\text{Tr}(A) = 0$.*

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

Demostración. \Rightarrow Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una involución. Por ser una homografía su ecuación general viene dada por

$$\alpha\theta\theta' + \beta\theta + \gamma\theta' + \delta = 0$$

ecuación que cumple la coordenada no homogénea θ que se transforma en θ' .

Dado que es involución θ' se transforma en θ con lo que se debe cumplir

$$\alpha\theta'\theta + \beta\theta' + \gamma\theta + \delta = 0$$

Restando y operando se llega a que

$$(\beta - \gamma)(\theta - \theta') = 0$$

Por tanto, para que esto se cumpla para todo θ , se tiene que $\beta = \gamma$, pues h no es la identidad. Dado que $\beta = -a$, $\gamma = d$ esto implica que $d = -a$ y con ello la matriz asociada a la involución es

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & -a \end{pmatrix}$$

con traza nula. Se concluye así que si h es una involución entonces $\text{Tr}(A) = 0$.

\Leftarrow Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una homografía cuya matriz asociada tiene traza nula, es decir, $d = -a$. Dado que $\beta = -a$, $\gamma = d$, esto implica que la ecuación general de la homografía es simétrica respecto a θ y θ' , es decir

$$\alpha\theta\theta' + \beta(\theta + \theta') + \delta = 0$$

Sea entonces un punto P tal que $h(P) \neq P$ y sean θ, θ' las coordenadas no homogéneas de P y $h(P)$ respectivamente, que cumplen la ecuación anterior pues θ se transforma en θ' . Dado que es simétrica respecto a θ y θ' podemos intercambiar las coordenadas y la ecuación se seguirá cumpliendo.

$$\alpha\theta'\theta + \beta(\theta' + \theta) + \delta = 0$$

Pero esta ecuación implica que θ' se transforma en θ , es decir que $h(h(P)) = P$.

Dado que P es un punto arbitrario distinto de los puntos fijos de h , se concluye que $h^2 = id$ y con ello h es una involución. ■

A lo largo de estas dos demostraciones hemos estado excluyendo los puntos fijos de h . Pero ¿cuántos son esos puntos fijos? En principio, dado que una involución es una homografía, si nos encontramos en \mathbb{C} , podrá tener dos puntos fijos o un punto fijo doble. Sin embargo, como veremos a continuación, las involuciones no pueden tener un punto fijo doble.

Lema 6.4.3. *Si una involución tiene puntos fijos, entonces han de ser dos puntos distintos.*

Demostración. Recordemos que si estamos en \mathbb{R} una homografía puede no tener puntos fijos. Supongamos que la involución $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ sí tiene puntos fijos, cosa que siempre ocurre si $\mathbb{K} = \mathbb{C}$. Recordemos que si tomamos como referencia la formada por los puntos fijos, la matriz A asociada a la involución es diagonal, en el caso de tener dos puntos fijos, o de la forma

$$\begin{pmatrix} a & a \\ 0 & a \end{pmatrix}$$

para cierto a , en el caso de tener un punto fijo doble. Dado que h es una involución, su matriz debe ser de traza nula, y esto solo ocurre si es diagonal, con autovalores λ iguales y de signo opuesto.

También se puede llegar a la misma conclusión, que la matriz A es necesariamente diagonal y con ello h tiene dos puntos fijos, teniendo en cuenta que como $h^2 = id$ entonces $A^2 = \rho I$, con $\rho = \lambda^2$ ■

Por tanto las involuciones pertenecen al primer grupo de homografías tratadas en este capítulo. Trabajemos en \mathbb{C} . Recordemos que para las homografías con dos puntos fijos habíamos definido el módulo de la homografía. Hallemos el valor de k para una involución h a través de la razón doble en el siguiente lema.

Lema 6.4.4. *Dada una homografía h de \mathbb{P}^1 , esta tiene dos puntos fijos con módulo $k = -1$ si y solo si h es una involución.*

Demostración. $\boxed{\Leftarrow}$ Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una involución. Por el lema 6.4.3 h tiene dos puntos fijos. Basta comprobar que $k = -1$. Para ello, tomemos la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N; P\}$ donde M y N son los puntos fijos de h y P es un punto arbitrario distinto de M y N . Entonces

$$\{M, N, P, h(P)\} = k$$

Como las homografías preservan la razón doble se tiene que

$$k = \{M, N, P, h(P)\} = \{h(M), h(N), h(P), h(h(P))\} = \{M, N, h(P), P\} = \frac{1}{k}$$

Con ello $k = 1/k \Leftrightarrow k^2 = 1 \Leftrightarrow k = -1, k = 1$. Si $k = 1$, entonces eso significaría, por las propiedades de la razón doble, que $P = h(P)$ para todo P . Pero h no es la identidad. Por tanto $k = -1$.

$\boxed{\Rightarrow}$ Sea $h : \mathbb{P}^1 \rightarrow \mathbb{P}^1$ una homografía con dos puntos fijos M y N tal que $k = -1$, es decir, dado un punto P arbitrario distinto de M y N

$$\{M, N, P, h(P)\} = -1$$

en la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N; P\}$. Por la simetría de la razón doble se tiene que

$$\{M, N, h(P), P\} = -1$$

Además, dado que las homografías preservan la razón doble

$$\{M, N, P, h(P)\} = \{h(M), h(N), h(P), h(h(P))\} = \{M, N, h(P), h^2(P)\} = -1$$

por lo que

$$\{M, N, h(P), P\} = -1 = \{M, N, h(P), h^2(P)\}$$

Esto se cumple si $h^2(P) = P$. Dado que P es arbitrario se concluye que h es una involución. ■

Concluimos así que h es una involución si y solo si el par $(P, h(P))$ está separado armónicamente del par (M, N) de puntos fijos.

Recordando lo estudiado al principio de este capítulo, y dado que una involución tiene dos puntos fijos y $k = -1$, se tiene que la ecuación canónica, respecto a la referencia $\mathfrak{R} = \{M, N; E\}$, de la involución es

$$\theta' = -\theta \tag{6.19}$$

Se deduce inmediatamente del lema anterior que si una homografía con dos puntos fijos tiene como ecuación canónica $\theta' = -\theta$, entonces es una involución.

6.4.1. Haz de ecuaciones de segundo grado

Apéndice A

Álgebra Lineal

Este apéndice está especialmente pensado para los alumnos de los dobles grados, que, a fecha de escribir este texto, cursan la asignatura de geometría lineal y la de álgebra lineal con un año de separación.

Este hecho añade a la presente materia un plus de dificultad, pues hace echar mano constantemente de la bibliografía de primer curso, que, en muchas ocasiones, no es suficiente, por ejemplo en el estudio de la *dualidad*.

Algo que merece la pena recalcar es que aquí únicamente se incluyen los resultados más elementales acerca de dualidad, ya que sabemos por experiencia que los resultados más profundos se omiten en un primer curso de álgebra lineal (a pesar de ser harto necesarios aquí). Es por esta razón, no hacer visitar un apéndice al lector sin necesidad, que estos conceptos gozan de sección propia en el texto ordinario.

El objetivo de este anexo no es otro que recopilar los conceptos y resultados que consideramos totalmente imprescindibles para seguir el texto, no obstante, no pretende ser, ni mucho menos, tan completo o rico en ejemplos como otros títulos específicos de álgebra lineal que se recomiendan en la bibliografía.

A.1. Coordenadas en Espacios Vectoriales

El objetivo de esta sección es servir como pequeño área de repaso a la hora de entrar en conceptos íntimamente ligados con los cambios de base en espacios vectoriales. Un ejemplo claro de esto son los cambios de referencia proyectiva.

Sea E un \mathbb{K} -espacio vectorial de dimensión finita n .

Asimismo, consideraremos la base $\mathcal{B} := \{b_1, \dots, b_n\}$ de E .

Proposición A.1.1 (Escritura Única de un Vector). *Dado un vector $u \in E$, este tiene una escritura **única** como combinación lineal de los vectores de la base \mathcal{B} .*

Demostración. La existencia de esta escritura es evidente, por ser \mathcal{B} una base de E , y, por tanto, un sistema de generadores. En consecuencia, lo único que hay que probar es la unicidad de dicha combinación lineal. En efecto, supongamos que hubiera dos:

$$u = \alpha_1 b_1 + \dots + \alpha_n b_n = \beta_1 b_1 + \dots + \beta_n b_n$$

Pasando todo al segundo miembro y sacando factor común obtenemos:

$$(\alpha_1 - \beta_1)b_1 + \dots + (\alpha_n - \beta_n)b_n = 0$$

Como los vectores de la base son linealmente independientes, se tiene que todos los coeficientes deben ser nulos. Es decir:

$$\alpha_i - \beta_i = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

De donde se sigue la necesaria igualdad de ambas escrituras. ■

Observación A.1.1 (Coordenadas de un Vector Respecto de una Base). Es evidente que, **fijada una base**, todo vector queda caracterizado por su escritura como combinación lineal de los vectores de dicha base. Es por este motivo que, dado un vector $u \in E$ cualquiera, emplearemos la siguiente notación:

$$u = \alpha_1 b_1 + \cdots + \alpha_n b_n \stackrel{\text{not.}}{=} (\alpha_1, \dots, \alpha_n)_{\mathcal{B}}$$

A la tupla de escalares $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ la denominaremos *coordenadas de u respecto de la base \mathcal{B}* . \diamond

Por supuesto, si decidimos tomar otra base \mathcal{B}' , las coordenadas de los vectores respecto de la base \mathcal{B}' serán, en general, distintas a las coordenadas respecto de \mathcal{B} .

Un problema interesante, y que resolveremos en A.1.1, consiste en encontrar una relación o ligadura entre ambas coordenadas.

Observación A.1.2 (Coordenadas del i -ésimo Vector de la Base). Dado el vector b_i , es interesante notar que sus coordenadas respecto de la base \mathcal{B} , de la que, recordemos, es el i -ésimo vector, son:

$$b_i = (0, \dots, \overbrace{1}^i, \dots, 0)_{\mathcal{B}}$$

La comprobación es inmediata y se deja al lector. \diamond

A.1.1. Matriz de Cambio de Base

Sean $\mathcal{B} := \{e_1, \dots, e_n\}$ y $\mathcal{B}' := \{e'_1, \dots, e'_n\}$ dos bases de un espacio vectorial E . En estas condiciones, dado un vector cualquiera $u \in E$, podemos escribirlo de dos maneras distintas:

$$u = \alpha_1 e_1 + \cdots + \alpha_n e_n \quad (\text{A.1})$$

$$u = \beta_1 e'_1 + \cdots + \beta_n e'_n \quad (\text{A.2})$$

Escribiendo cada vector de \mathcal{B}' como combinación lineal de los vectores de \mathcal{B} , es decir, en coordenadas de \mathcal{B} obtenemos (los exponentes son simplemente superíndices):

$$e'_i = \gamma_1^i e_1 + \cdots + \gamma_n^i e_n \quad (\text{A.3})$$

Uniendo las ecuaciones se tiene:

$$\begin{aligned} u &= \beta_1 (\gamma_1^1 e_1 + \cdots + \gamma_n^1 e_n) + \cdots + \beta_n (\gamma_1^n e_1 + \cdots + \gamma_n^n e_n) = \\ &= (\beta_1 \gamma_1^1 e_1 + \cdots + \beta_1 \gamma_n^1 e_n) + \cdots + (\beta_n \gamma_1^n e_1 + \cdots + \beta_n \gamma_n^n e_n) = \\ &= (\beta_1 \gamma_1^1 + \cdots + \beta_n \gamma_1^n) e_1 + \cdots + (\beta_1 \gamma_n^1 + \cdots + \beta_n \gamma_n^n) e_n \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

La traducción de esto a términos de coordenadas nos arroja (los corchetes son simplemente corchetes para una mejor visualización):

$$u = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)_{\mathcal{B}} = ([\beta_1 \gamma_1^1 + \cdots + \beta_n \gamma_1^n], \dots, [\beta_1 \gamma_n^1 + \cdots + \beta_n \gamma_n^n])_{\mathcal{B}} \quad (\text{A.5})$$

Esto, por comodidad, lo interpretaremos como producto de matrices (compruébese):

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1^1 & \cdots & \gamma_1^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_n^1 & \cdots & \gamma_n^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Usando una notación más compacta:

$$X_{\mathcal{B}} = P X_{\mathcal{B}'} \quad (\text{A.7})$$

Obsérvese que la matriz P es **cuadrada** e **invertible**, por ser la matriz formada al poner por columnas los vectores de la base \mathcal{B}' respecto de la base \mathcal{B} .

Por esta razón, podemos despejar $X_{\mathcal{B}'}$, obteniendo la relación inicialmente buscada:

$$X_{\mathcal{B}'} = P^{-1} X_{\mathcal{B}} \quad (\text{A.8})$$

A la matriz P^{-1} se la denomina *matriz de cambio de base de \mathcal{B} a \mathcal{B}'* . Es interesante comprobar que su inversa es la matriz de cambio entre las mismas bases en sentido contrario.

Para cerrar la sección diremos, como curiosidad, que toda matriz invertible constituye una matriz de cambio entre ciertas bases.

A.2. Ecuaciones de Subespacios

El objetivo de esta sección será caracterizar un subespacio vectorial por el conjunto de soluciones de una ecuación o conjunto de ecuaciones (siempre lineales y homogéneas). A estas ecuaciones las denominaremos *ecuaciones cartesianas*. Son de importancia capital en el estudio de la dualidad.

A.2.1. Existencia de las Ecuaciones Cartesianas

Sea E un espacio vectorial de dimensión n y sea U un subespacio vectorial cualquiera de E .

Sea $\mathcal{B}_U := \{u_1, \dots, u_r\}$ una base de U .

Ecuaciones Paramétricas

Sea $x \in U$, entonces podemos escribirlo tanto en coordenadas de \mathcal{B}_U como en coordenadas de la base del espacio total \mathcal{B} . Es decir:

$$x = \alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_n e_n \quad (\text{A.9})$$

$$x = \beta_1 u_1 + \dots + \beta_r u_r \quad (\text{A.10})$$

Usando los mismos trucos que utilizamos para cálculo de la matriz de cambio de base, podemos escribir los vectores de la base \mathcal{B}_U como combinación lineal de los vectores del espacio total:

$$u_i = \gamma_1^i e_1 + \dots + \gamma_n^i e_n \quad (\text{A.11})$$

Sustituyendo y reagrupando:

$$\begin{aligned} x &= \beta_1(\gamma_1^1 e_1 + \dots + \gamma_n^1 e_n) + \dots + \beta_r(\gamma_1^r e_1 + \dots + \gamma_n^r e_n) = \\ &= (\beta_1 \gamma_1^1 e_1 + \dots + \beta_1 \gamma_n^1 e_n) + \dots + (\beta_r \gamma_1^r e_1 + \dots + \beta_r \gamma_n^r e_n) = \\ &= (\beta_1 \gamma_1^1 + \dots + \beta_r \gamma_1^r) e_1 + \dots + (\beta_1 \gamma_n^1 + \dots + \beta_r \gamma_n^r) e_n \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Expresado de forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1^1 & \dots & \gamma_1^r \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_n^1 & \dots & \gamma_n^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_r \end{pmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Con una notación más compacta escribimos:

$$X = P\Lambda \quad (\text{A.14})$$

Nótese que la matriz P no es cuadrada por lo general, además, es la matriz resultante de poner por columnas las coordenadas de los vectores de \mathcal{B}_U en la base \mathcal{B} .

Reflexionemos un segundo acerca de lo que acabamos de hacer. Dado un subespacio U , queríamos caracterizarlo como el conjunto de vectores que verificaban un conjunto de ecuaciones.

Pues bien, dada una base de U , hemos conseguido una serie de ecuaciones tales que, dado un vector $u = (u_1, \dots, u_n)_{\mathcal{B}} \in E$, nos escupen un sistema de n ecuaciones lineales con r incógnitas, que, en caso de resultar ser incompatible nos avisa de que $u \notin U$, y en caso contrario, tras la resolución del sistema obtenemos las coordenadas de u en la base \mathcal{B}_U .

Sin embargo, esto se puede afinar un poco más todavía. Es por eso que en el siguiente apartado se estudian las coordenadas cartesianas o implícitas.

Nótese que el camino que hemos hecho también es de vuelta, ya que, dadas unas ecuaciones paramétricas de un subespacio, podemos hallar una base del mismo, basta tomar las columnas de la matriz de coeficientes.

De momento tenemos:

$$\boxed{\boxed{\text{BASE}}} \rightleftharpoons \boxed{\boxed{\text{EC. PARAMÉTRICAS}}}$$

Ecuaciones Cartesianas o Implícitas

Como dijimos en el apartado anterior, las ecuaciones paramétricas son un gran paso, pero deben afinarse un poco más, pues aún no son un conjunto de ecuaciones lineales homogéneas que caractericen por sí solas al subespacio U .

A continuación daremos dos métodos para hallar las ecuaciones cartesianas a partir de las ecuaciones paramétricas. A uno de ellos le bautizaremos cariñosamente como “método ortopédico”.

Método Ortopédico Como ya aventuramos en el apartado anterior, si insertamos un vector $x \in U$ a las ecuaciones $X = P\Lambda$, se nos remitía a un sistema de ecuaciones lineales compatible determinado.

Esto quiere decir, por el teorema de Rouché–Frobenius que:

$$\text{rg}(P|X) = \text{rg}(P)$$

Por ende ninguna submatriz cuadrada de la matriz ampliada $(P|X)$ es regular, es decir, todas tienen determinante nulo.

Esto es maravilloso, puesto que proporciona un conjunto de ecuaciones lineales homogéneas (nunca podrán ser no lineales ya que las incógnitas se encuentran en la misma columna de la matriz ampliada).

Observaciones Dicho lo cual, si $x \in U$, insertando el vector en las ecuaciones obtenidas, las deberá verificar a la fuerza, con lo que lo hemos conseguido, hemos caracterizado a un subespacio mediante el conjunto de soluciones de un sistema homogéneo de ecuaciones lineales.

Para realizar el camino de vuelta, es decir, deducir unas ecuaciones paramétricas a partir de unas implícitas, basta resolver el sistema de ecuaciones homogéneo (cosa siempre posible).

Con lo que tenemos:

$$\boxed{\text{BASE}} \Leftrightarrow \boxed{\text{EC. PARAMÉTRICAS}} \Leftrightarrow \boxed{\text{EC. CARTESIANAS}}$$

Antes de meternos con el segundo método (que aligera los cálculos), necesitamos ver la relación que existe entre el número de ecuaciones cartesianas y la dimensión del subespacio al que caracterizan.

Proposición A.2.1 (Ecuaciones Cartesianas y Dimensión). *Sea U un subespacio vectorial de dimensión r de E , el número de ecuaciones cartesianas esenciales que le caracteriza es igual a su codimensión.*

Demostración. Dado un sistema homogéneo de n ecuaciones lineales, para que su conjunto de soluciones dependa de r parámetros, es decir, para que obtenegamos unas ecuaciones paramétricas con r incógnitas, debe haber exactamente $n - r$ “ecuaciones esenciales”. ■

Método de Eliminación de Parámetros Para obtener unas ecuaciones cartesianas a partir de unas ecuaciones paramétricas, basta interpretar a las ecuaciones paramétricas como la solución al sistema homogéneo de ecuaciones lineales que queremos encontrar. Es decir, deberemos aplicar el algoritmo de Gauss–Jordan al revés.

A.3. Dualidad

Sea E un \mathbb{K} -espacio vectorial de dimensión n .

Definición A.3.1 (Espacio Dual). Se llama *espacio dual* de E al conjunto todas de las aplicaciones lineales que nacen en E y mueren en \mathbb{K} . Es decir:

$$E^* := \{f \in \text{Hom}(E, \mathbb{K})\}$$

A las aplicaciones lineales que conforman el espacio dual se las denomina *formas lineales*.

Nótese que si E^* recibe el nombre de “espacio”, es porque se lo merece, es decir, E^* tiene estructura de espacio vectorial (la comprobación es inmediata).

A continuación calculamos de manera inmediata la dimensión del espacio dual.

Lema A.3.1 (Dimensión del Espacio Dual). $\dim(E) = \dim(E^*)$

Demostración. contenidos... ■

Continuemos definiendo varios conceptos imprescindibles del espacio dual.

Definición A.3.2 (Anulador de un Subconjunto). Sea S un subconjunto de E , denominamos *anulador de S* al conjunto de las formas lineales tales que anulan todos los vectores de S . Es decir:

$$S^\perp = \{f \in E^* \mid f(u) = 0 \ \forall u \in S\}$$

Es un ejercicio de cálculo rutinario la demostración de que el anulador de un subespacio de E es un subespacio de E^* .

Una propiedad interesante de los anuladores es que el anulador de un subconjunto S , coincide con el anulador de la variedad lineal engendrada por S . Veámoslo.

Lema A.3.2 (Anuladores y Variedades Engendradas). *Sea S un subconjunto arbitrario no vacío de E , entonces:*

$$S^\perp = \mathcal{L}(S)^\perp$$

Demostración. $\boxed{\subset}$ Consideremos una forma lineal $f \in S^\perp$, como todo vector de $x \in \mathcal{L}(S)$ se escribe de la forma $x = \alpha_1 s_1 + \dots + \alpha_r s_r$, está claro que, usando la linealidad de f , $f(x) = 0$.

$\boxed{\supset}$ Como $S \subset \mathcal{L}(S)$, toda forma lineal que anule los vectores de $\mathcal{L}(S)$ también anulará a los vectores de S . ■

Se presenta a continuación un resultado importante en el estudio de la dualidad. Se incluye aquí por poseer una demostración que solo aportaría ruido en el texto principal. A pesar de parecer trivial, a mi entender, no lo es tanto.

Proposición A.3.3 (Criterio de Equivalencia de Ecuaciones Homogéneas). *Dadas dos ecuaciones lineales homogéneas equivalentes:*

$$A \equiv a_1 x_1 + \dots + a_n x_n = 0$$

$$B \equiv b_1 x_1 + \dots + b_n x_n = 0$$

Entonces son múltiplos la una de la otra, es decir:

$$b_i = \lambda a_i \ \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

Demostración. Supongamos que no.

Cada ecuación tendrá una matriz fila asociada:

$$A = (a_1 \quad \dots \quad a_n)$$

$$B = (b_1 \quad \dots \quad b_n)$$

Por definición de “equivalencia por filas”, estas dos matrices serán equivalentes por filas si y solo si una es múltiplo de la otra, como esto no pasa, las matrices no son equivalentes por filas y por ende tendrán distinta forma normal de Hermite por filas.

$$\begin{aligned} A &\equiv H_A^f = (1 \quad a'_2 \quad \cdots \quad a'_n) \\ B &\equiv H_B^f = (1 \quad b'_2 \quad \cdots \quad b'_n) \end{aligned}$$

Estas matrices inducen sendas ecuaciones lineales equivalentes a la primera y segunda ecuación respectivamente.

Como $H_A^f \neq H_B^f$ existe al menos un $i \in \{2, \dots, n\}$ tal que $a'_i \neq b'_i$. Supongamos sin pérdida de generalidad (pues siempre podemos renombrar y recolocar incógnitas) que:

$$\begin{aligned} a'_i &= b'_i \quad \forall i \in \{2, \dots, r\} \\ a'_j &\neq b'_j \quad \forall j \in \{r+1, \dots, n\} \end{aligned}$$

Sea $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ una solución no trivial con las $n-r$ últimas componentes no nulas (esto siempre puede hacerse al depender la solución de la ecuación de $n-1$ parámetros) para la primera ecuación. Veámos que, en caso de ser solución de la segunda, ambas ecuaciones serían múltiplos la una de la otra (llegando así a un absurdo).

Por el momento tenemos:

$$B \equiv \alpha_1 + b'_2 \alpha_2 + \cdots + b'_n \alpha_n = \xi$$

Sumamos la primera ecuación a la segunda y reagrupamos términos:

$$2\alpha_1 + 2a'_2 \alpha_2 + \cdots + 2a'_r \alpha_r + \alpha_{r+1}(a'_{r+1} + b'_{r+1}) + \cdots + \alpha_n(a'_n + b'_n) = \xi + 0 = \xi$$

Con una notación más compacta:

$$2\alpha_1 + 2 \sum_{i=2}^r a'_i \alpha_i + \sum_{j=r+1}^n (a'_j + b'_j) \alpha_j = \xi$$

Tratemos de encontrar una expresión para ξ , partiendo de que:

$$A \equiv 2\alpha_1 + 2 \sum_{i=2}^r a'_i \alpha_i + 2 \sum_{j=r+1}^n a'_j \alpha_j = 0$$

Pasando el segundo término al otro lado:

$$2\alpha_1 + 2 \sum_{i=2}^r a'_i \alpha_i = -2 \sum_{j=r+1}^n a'_j \alpha_j$$

Sumando $\sum_{j=r+1}^n (a'_j + b'_j) \alpha_j$ a ambos lados:

$$2\alpha_1 + 2 \sum_{i=2}^r a'_i \alpha_i + \sum_{j=r+1}^n (a'_j + b'_j) \alpha_j = -2 \sum_{j=r+1}^n a'_j \alpha_j + \sum_{j=r+1}^n (a'_j + b'_j) \alpha_j = \xi$$

Luego por fin, reagrupando:

$$\xi = \sum_{j=r+1}^n \alpha_j (b'_j - a'_j)$$

Recapitemos. Teníamos que:

$$\alpha_1 + b'_2 \alpha_2 + \cdots + b'_n \alpha_n = \xi$$

Si $\xi = 0$ tendríamos que:

$$\begin{aligned} B &\equiv \alpha_1 + b'_2 \alpha_2 + \cdots + b'_n \alpha_n \stackrel{\xi=0}{=} \alpha_1 + b'_2 \alpha_2 + \cdots + b'_n \alpha_n - \xi = \\ &= \alpha_1 + \sum_{i=2}^r a'_i \alpha_i + \sum_{j=r+1}^n b'_j \alpha_j - \sum_{j=r+1}^n \alpha_j (b'_j - a'_j) = \alpha_1 + \sum_{k=2}^n a'_k \alpha_k = 0 \end{aligned}$$

Luego $b'_k = a'_k \quad \forall j \in \{r+1, \dots, n\}$, lo cual contradice que las formas normales de Hermite sean distintas. ■

Apéndice B

Mierdas varias

En este apéndice irán, de momento, los conceptos sin fundamentar (y mal explicados).

Comencemos con un ejemplo de ecuaciones paramétricas, completado con cierta interpretación del espacio proyectivo no formalizada aún.

Ejemplo B.0.1 (Parametrización de una Recta Concreta). Dados los puntos $P = (1 : 2 : -1)$ y $Q = (0 : 1 : 3)$ se nos pide parametrizar la recta PQ . Siguiendo los pasos expuestos en este apartado, la ecuación paramétrica de la recta PQ queda:

$$PQ : \{(\theta : 2\theta + 1 : -\theta + 3) \parallel \theta \in \mathbb{P}^1\}$$

donde, cuando $\theta = \infty$, nos referimos al punto $P = (1 : 2 : -1)$.

Imaginemos que ahora queremos hacernos una idea de donde se encuentra esa recta en \mathbb{R}^3 , es decir, queremos “pintar” los rayos de esa variedad proyectiva de dimensión uno. Para ello, debemos escoger un representante afín, y los rayos serán las rectas que vayan desde el $(0, 0, 0)$ hasta el punto de corte de los vectores representantes de la recta proyectiva con ese plano. Así, además, determinamos donde se encuentran los puntos del infinito del espacio proyectivo. Si elegimos el plano $z = 1$, entonces los puntos del infinito estarán en el plano xy .

Elegimos pues el plano $z = 1$ como representante afín. Para poder representar los rayos de nuestra recta proyectiva debemos determinar su punto de corte con el plano $z = 1$. Por ello dividimos entre z . Obtenemos así las ecuaciones

$$x = \frac{\theta}{-\theta + 3}, \quad y = \frac{2\theta + 1}{-\theta + 3}, \quad z = 1$$

Nótese que hay dos indeterminaciones. Cuando $\theta = \infty$, como ya dijimos, nos referimos al punto P , que al dividir entre z nos da el vector representante $(-1, -2, 1)$. Cuando $\theta = 3$, entonces $z = 0$ y nos vamos al plano xy , al infinito. \diamond

Pasamos al apartado de ecuaciones implícitas, donde esta misma idea se utiliza para expresar una recta, y en la siguiente observación un plano, a partir de su ecuación implícita en coordenadas no homogéneas.

Observación B.0.1. Recordemos que, al describir una recta por sus ecuaciones paramétricas, lo hicimos a través de coordenadas homogéneas y no homogéneas. Se puede hacer lo mismo con la ecuación implícita. Observemos que cualquier punto de coordenadas (x, y) queda definido, salvo una constante de proporcionalidad, por la terna (z_0x, z_0y, z_0) , con $z_0 \neq 0$. Asimismo, cualquier terna (z_0x, z_0y, z_0) , con $z_0 \neq 0$, o sus proporcionales, determina un único punto de coordenadas $(x, y) = (\frac{z_0x}{z_0}, \frac{z_0y}{z_0})$.

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{R}^2 & \hookrightarrow & \mathbb{R}^3 & \rightarrow & \mathbb{P}(\mathbb{R}^3) = \mathbb{P}^2 \\ (x, y) & \rightarrow & (z_0x, z_0y, z_0) & \rightarrow & (z_0x : z_0y : z_0) \\ (\frac{x}{z}, \frac{y}{z}) & \longleftarrow & & & (x : y : z) \end{array}$$

Por tanto, las coordenadas homogéneas (x, y, z) de la ecuación implícita pasan a ser las coordenadas no homogéneas $(X, Y) = (\frac{x}{z}, \frac{y}{z})$, quedando así la ecuación de la recta

$$aX + bY + c = 0 \tag{B.1}$$

donde no están incluidos los puntos con $z = 0$.

◇

Observación B.0.2. Recordemos que podíamos describir la recta a través de la ecuación implícita en coordenadas no homogéneas. En este caso, esto también es posible. Generalizando la observación B.0.1 a nuestro caso, es decir a $\mathbb{P}^3 = \mathbb{P}(\mathbb{R}^4)$, la ecuación implícita del plano en coordenadas no homogéneas quedaría

$$aX + bY + cZ + d = 0 \tag{B.2}$$

donde

$$X = \frac{x}{t}; \quad Y = \frac{y}{t}; \quad Z = \frac{z}{t}$$

◇