

TEOREMA DEL PUNTO FIJO DE BOREL

ENZO GIANNOTTA

RESUMEN. En este artículo probaremos el Teorema del punto fijo de Borel, el cual dice que todo grupo algebraico afín y soluble actuando en una variedad algebraica proyectiva admite un punto fijo.

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Notación, convenciones y hechos preliminares	2
3. Terminología de teoría de grupos y acciones	2
4. Variedades Bandera	3
5. Introducción a Grupos Algebraicos	4
6. La componente de la identidad	5
7. Subgrupos y Homomorfismos	6
8. Acciones de grupos algebraicos sobre variedades	7
9. Grupos solubles y nilpotentes	9
10. Resumen de variedades completas	9
11. Teorema del punto fijo de Borel	10
12. Consecuencias	10
13. Cosas para agregar	14
Referencias	14

I feel that what mathematics needs
least are pundits who issue
prescriptions or guidelines for
presumably less enlightened
mortals.

Armand Borel

1. INTRODUCCIÓN

La verdadera geometría algebraica comienza al considerar ecuaciones polinomiales cúbicas. Todo aquello de grado menor, tales como aplicaciones lineales o formas cuadráticas, puede ser pensado utilizando métodos de álgebra lineal. Una gran cantidad de trabajo, desde los comienzos de la geometría algebraica hasta nuestros días, ha sido dedicado al estudio de ecuaciones cúbicas. Por ejemplo, las hipersuperficies cúbicas de dimensión 1 son llamadas *curvas elípticas* y ocupan un lugar central en geometría algebraica y aritmética.

El propósito de este artículo es estudiar superficies cúbicas, es decir, superficies $S \subseteq \mathbb{P}^3(k)$ dadas por un polinomio homogéneo $f(x_0, x_1, x_2, x_3)$ de grado 3. Más precisamente, probaremos el siguiente resultado descubierto originalmente por Cayley y Salmon en 1849.

Teorema A. *Sea k un cuerpo algebraicamente cerrado. Entonces, toda superficie cúbica suave $S \subseteq \mathbb{P}^3(k)$ posee exactamente 27 rectas.*

Recordemos que una variedad algebraica X es *racional* si posee un abierto de Zariski no-vacío $U \subseteq X$ isomorfo a un abierto no-vacío V del espacio afín $\mathbb{A}^n(k)$. Como aplicación del teorema anterior, probaremos que toda superficie cúbica suave es racional. Más precisamente, probaremos el siguiente resultado.

Teorema B. Sea k un cuerpo algebraicamente cerrado. Entonces, toda superficie cúbica suave $S \subseteq \mathbb{P}^3(k)$ es isomorfa al blow-up del plano proyectivo $\mathbb{P}^2(k)$ en 6 puntos.

Estructura del artículo. La Sección 2 recopila notaciones, convenciones y hechos conocidos que serán usados a lo largo del artículo. También estableceremos algunos hechos preliminares. En particular, discutimos el hecho que el espacio de parámetros de superficies cúbicas en \mathbb{P}^3 es isomorfo a \mathbb{P}^{19} , y que las superficies singulares forman un divisor irreducible (i.e., una hipersuperficie de dimensión 18 dentro de dicho \mathbb{P}^{19}). La Sección 3 está dedicada a probar el Teorema A. Finalmente, en la Sección 4 recordamos el concepto de racionalidad y probamos el Teorema B.

Agradecimientos. Agradezco al profesor Pedro por sugerir este tema para el artículo, y por hacer disponible el material bibliográfico necesario para prepararlo.

2. NOTACIÓN, CONVENCIONES Y HECHOS PRELIMINARES

2.1. Convención. Durante todo el artículo, todas las variedades y morfismos estarán definidos sobre un cuerpo k algebraicamente cerrado, de característica arbitraria.

2.2. Notación. Denotamos por \mathbb{P}^n (resp. \mathbb{A}^n)S al *espacio proyectivo* $\mathbb{P}^n(k)$ (resp. *espacio afín* $\mathbb{A}^n(k)$) de dimensión n sobre el cuerpo k . Más generalmente, dado un espacio vectorial de dimensión finita V , denotamos por $\mathbb{P}(V)$ a la *proyektivización* de V , i.e., el conjunto de todos los subespacios vectoriales de dimensión 1 de V . El *grupo multiplicativo* $\mathbb{G}_m := (k^\times, \cdot)$.

Dada una variedad X , denotamos por X_{sing} al sub-conjunto de puntos singulares de X . En particular, X es una variedad suave si y sólo si $X_{\text{sing}} = \emptyset$. En contraste, definimos X_{reg} al sub-conjunto de puntos suaves de X .

3. TERMINOLOGÍA DE TEORÍA DE GRUPOS Y ACCIONES

En esta sección introducimos notación clásica de Teoría de Grupos. Sea G un grupo, escribamos

- $Z(G)$ es el **centro** de G , es decir, todos los $x \in G$ tales que $xg = gx$ para todo $g \in G$.
- $R(G)$ es el **radical** de G , es decir, el subgrupo conexo normal soluble de G . Donde estamos suponiendo que G es un *grupo algebraico*.
- Dado $S \subset G$, $C_G(S)$ es el **centralizador** de S , es decir, los $x \in G$ tales que $xg = gx$ para todo $g \in S$. Cuando $S = \{x\}$ es un singleton, escribimos $C_G(x)$ en lugar de $C_G(S)$. Dado $y \in G$, definimos la **clase de conjugación** (de y), como el conjunto de elementos de G de la forma zyz^{-1} , $z \in G$. Las clases de conjugación particionan G .
- Dado $S \subset G$, $N_G(S)$ es el **normalizador** de S , es decir, los $x \in G$ tales que $xgx^{-1} \in S$ para todo $g \in S$. Cuando $S = \{x\}$ es un singleton, escribimos $N_G(x)$ en lugar de $N_G(S)$.
- $[G, G]$ es el **subgrupo derivado** de G , es decir, el subgrupo generado por los conmutadores $[x, y] := xyx^{-1}y^{-1}$ con $x, y \in G$. Más generalmente, si $S_1, S_2 \subset G$, escribimos $[S_1, S_2]$ para el subgrupo generado por los $[s_1, s_2]$ con $s_1 \in S_1$ y $s_2 \in S_2$.
- Dado un conjunto arbitrario X , una **acción** de G (decimos también que G **actúa** sobre X , o para no confundirnos con otras estructuras que aparecerán más adelante, que G **actúa mórficamente** en X) es un mapa

$$\begin{aligned} \varphi : G \times X &\longrightarrow X \\ (g, x) &\longmapsto g \cdot x \end{aligned}$$

tal que $1 \cdot x = x$ y $(gh) \cdot x = g \cdot (h \cdot x)$ para todo $x \in X$ y $g, h \in G$. Dado un conjunto $S \subset X$, escribimos G_S para el **estabilizador** o **grupo de isotropía** de S , es decir, los $g \in G$ tales que $g \cdot x = x$ para todo $x \in S$; claramente es un subgrupo de G . Cuando $S = \{x\}$ es un singleton, simplemente escribimos G_x en lugar de G_S . Por otro lado, $G \cdot S$ es la **órbita** de S , es decir, el conjunto de elementos $x \in X$ tales que $x = g \cdot s$ para algún $g \in G$ y $s \in S$. Cuando $S = \{x\}$ es un singleton, simplemente escribimos $G \cdot x$ en lugar de G_S . Quitando redundancias (i.e. $G \cdot x = G \cdot x'$), las órbitas particionan X .

- Decimos que un grupo G actúa **transitivamente** (sobre un conjunto X) si $G \cdot x = X$ para algún $x \in X$ (equivalentemente para todo $x \in X$). En particular, G actúa transitivamente en cada órbita.
- Si G actúa en X , entonces denotamos por X^G al conjunto de **puntos fijos** de G , i.e., aquellos $x \in X$ tales que $G \cdot x = \{x\}$, en otras palabras, los elementos cuya órbita es un singleton.
- Dados $Y, Z \subset X$, definimos el **transportador**, como el conjunto $\text{Tran}_G(Y, Z) := \{g \in G \mid g \cdot Y \subset Z\}$.

Ejemplo 3.1. Con estas definiciones y terminologías, dado un grupo G , este actúa sobre sus elementos vía **automorfismos interiores**, es decir, $y \mapsto xyx^{-1} =: \text{Int}_x(y)$, correspondiente al homomorfismo $G \rightarrow \text{Aut } G$; el núcleo es $Z(G)$ y la imagen es $\text{Int } G$ (el cual es un subgrupo normal de $\text{Aut}(G)$). La órbita de y son las clases de conjugación, y su grupo de isotropía el centralizador $C_G(y)$. Los puntos fijos corresponden con el núcleo del homomorfismo, i.e., $Z(G)$.

4. VARIEDADES BANDERA

En esta sección construiremos un ejemplo de variedades proyectivas: las *variedades bandera*.

Sea V un espacio vectorial de dimensión n sobre un cuerpo k . $\bigwedge V$ denota el **álgebra exterior** (el cociente del *álgebra de tensores* de V por el ideal bilátero generado por $v \otimes v$, $v \in V$). Recordemos que $\bigwedge V$ es una k -álgebra de dimensión finita, más aún, es una k -álgebra graduada por $\{\bigwedge^i V\}_{i=0}^n$. En particular $\bigwedge^0 V = k$ y $\bigwedge^1 V = V$. Dada una base ordenada (v_1, \dots, v_n) de V , entonces los *productos cuña* $v_{i_1} \wedge \dots \wedge v_{i_d}$ ($i_1 < i_2 < \dots < i_d$) forman una k -base de $\bigwedge^d V$ de cardinal $\binom{n}{d}$. En particular $\bigwedge^n V$ es 1-dimensional, i.e., el producto cuña de una base arbitraria de V está determinada salvo un múltiplo escalar. Si W es un subespacio vectorial de V , entonces podemos identificar canónicamente a $\bigwedge^d W$ con un subespacio de $\bigwedge^d V$.

Así, tenemos un mapa ψ saliendo del conjunto $\mathfrak{G}_d(V)$ de todos los subespacios d -dimensionales de V en $\mathbb{P}(\bigwedge^d V)$, que manda un subespacio D al punto en la proyectivización $\mathbb{P}(\bigwedge^d V)$ correspondiente a $\bigwedge^d D$ ($d \geq 1$). Afirmamos que ψ es inyectiva. En efecto, supongamos que D, D' son dos subespacios d -dimensionales. Fijemos una base de V de tal suerte que v_1, \dots, v_d genera D , mientras que v_r, \dots, v_{r+d-1} genera D' . De esta manera $v_1 \wedge \dots \wedge v_d$ no puede ser un múltiplo de $v_r \wedge \dots \wedge v_{r+d-1}$ a menos que $r = 1$, i.e. $D = D'$.

Para poder brindarle a $\mathfrak{G}_d(V)$ una estructura de variedad proyectiva, basta ver que la imagen de ψ es cerrada. Para esto, basta probarlo en cada cubrimiento afín de $\mathbb{P}(\bigwedge^d(V))$. Los casos $d = 1, d = n$ son triviales.

Fijemos una base ordenada (v_1, \dots, v_n) de V , y asociemos la base $\{v_{i_1} \wedge \dots \wedge v_{i_d}\}_{i_1 < \dots < i_d}$ de $\bigwedge^d V$. Consideremos los abiertos afines U que cubren $\mathbb{P}(\bigwedge^d(V))$ que consisten de puntos cuya coordenada homogénea relativa a $v_{i_1} \wedge \dots \wedge v_{i_d}$ ($i_1 < \dots < i_d$) es no nula. Por ejemplo, veamos por simplicidad el caso dado por $v_1 \wedge \dots \wedge v_d$. Veamos ahora que la intersección $\text{Im } \psi \cap U$ es cerrada en U . Pongamos D_0 como el subespacio generado por v_1, \dots, v_d . Claramente $\psi(D)$ pertenece a U si y solo si la proyección natural de V sobre D_0 manda D de manera isomorfa a D_0 . En este caso, las imágenes inversas de v_1, \dots, v_d forman una base de D de la forma $v_i + x_i(D)$ donde $x_i(D) := \sum_{j>d} a_{ij}v_j$ (y esta es la única base de D que tiene esta forma). El producto cuña luce de la siguiente forma

$$v_1 \wedge \dots \wedge v_d + \sum_{i=1}^d (v_1 \wedge \dots \wedge x_i(D) \wedge \dots \wedge v_d) + (\star),$$

donde (\star) involucre una base de vectores con dos o más v_1, \dots, v_d omitidos. Aquí se tiene que $v_1 \wedge \dots \wedge x_i(D) \wedge \dots \wedge v_d = \sum_{j>d} a_{ij} (v_1 \wedge \dots \wedge v_j \wedge \dots \wedge v_d)$ con v_j reemplazado por v_i . Por lo tanto $\pm a_{ij}$ ($1 \leq i \leq d, d+1 \leq j \leq n$) puede recuperarse como el coeficiente de la base de elementos $v_1 \wedge \dots \wedge \widehat{v_i} \wedge \dots \wedge v_d \wedge v_j$ (v_i omitido), en el producto cuña de la base de D dada arriba. Más aún, los coeficientes en (\star) son obviamente funciones polinomiales de los a_{ij} , independientes de D .

Recíprocamente, dados $d(n-d)$ escalares a_{ij} arbitrarios, claramente los vectores resultantes $v_i + x_i(D)$ generan un subespacio d -dimensional de V , cuya imagen bajo ψ yace en U . Consecuentemente, $\text{Im } \psi \cap U$ consiste de todos los puntos cuyas coordenadas afines son $(\dots a_{ij} \dots, f_k(a_{ij}) \dots)$, donde los a_{ij} son arbitrarios y los f_k son funciones polinomiales en $\mathbb{A}^{d(n-d)}$. Este conjunto se puede ver como el *grafo* de un morfismo de $\mathbb{A}^{d(n-d)}$ en otro espacio afín. Como los grafos son cerrados en la *topología Zariski producto* ([Mon23, Teorema 2.6.12.]), concluimos que $\text{Im } \psi \cap U$ es cerrado en U .

Definición 4.1. Las **variedades Grassmannianas** son los $\mathfrak{G}_d(V)$. Una **bandera** en V , es por definición una cadena

$$0 \subset V_1 \subset \dots \subset V_k = V$$

de subespacios k -vectoriales de V , tales que las inclusiones son propias. Una **bandera completa** es una en la que $k = \dim V$, i.e., $\dim V_{i+1}/V_i = 1$. $\mathfrak{F}(V)$ denota al conjunto de todas las banderas completas de V . Una vez que brindemos a $\mathfrak{F}(V)$ una estructura de variedad proyectiva, llamaremos a estas variedades: **variedad bandera** de V .

Como vimos en [Mon23, Corolario 2.7.17.], el producto de grassmanianas $\mathfrak{G}_1(V) \times \dots \times \mathfrak{G}_n(V)$ tiene la estructura de variedad proyectiva. Por otro lado, $\mathfrak{F}(V)$ se identifica con un subconjunto en este producto de

grassmanianas de manera obvia, luego para darle una estructura de variedad proyectiva basta ver que este conjunto es cerrado. Para simplificar la notación, consideremos solamente el producto $\mathfrak{G}_d(V) \times \mathfrak{G}_{d+1}(V)$, y probemos que el conjunto S de pares (D, D') con $D \subset D'$ es cerrado.

Nuevamente como antes, fijemos una base ordenada (v_1, \dots, v_n) de V , y consideremos dos abiertos afines de $\mathbb{P}(\bigwedge^d(V))$ y $\mathbb{P}(\bigwedge^{d+1}(V))$, de tal suerte que los productos cubren la variedad $\mathfrak{G}_d(V) \times \mathfrak{G}_{d+1}(V)$. Otra vez para simplificar la notación, tomemos estos abiertos afines U, U' definidos relativos a $v_1 \wedge \dots \wedge v_d$, $v_1 \wedge \dots \wedge v_{d+1}$ respectivamente. Si D (respectivamente D') es la imagen en U (respectivamente U'), obtenemos como ante bases canónicas: $v_i + x_i(D)$ ($1 \leq i \leq d$); $v_i + y_i(D')$ ($1 \leq i \leq d+1$). Con lo cual $x_i(D) = \sum_{j>d} a_{ij}v_j$, $y_i(D') = \sum_{j>d+1} b_{ij}v_j$. Notemos que $D \subset D'$ si y solo si $x_i(D) = y_i(D') + a_{i,d+1}(v_{d+1} + y_{d+1}(D'))$ para $1 \leq i \leq d$. Esto a su vez se convierte en condiciones polinomiales en los coeficientes a_{ij}, b_{ij} , con lo cual S interseca $U \times U'$ en un cerrado de $U \times U'$.

5. INTRODUCCIÓN A GRUPOS ALGEBRAICOS

Sea G una variedad algebraica dotada de estructura de grupo. Si los mapas

$$\begin{array}{ccc} \mu : G \times G & \longrightarrow & G \\ (x, y) & \longmapsto & xy \end{array}, \quad \begin{array}{ccc} \iota : G & \longrightarrow & G \\ x & \longmapsto & x^{-1} \end{array}$$

son morfismos de variedades, decimos que G es un **grupo algebraico**. Notar que un grupo algebraico no es un grupo topológico, excepto cuando la dimensión es 0. En efecto, para grupos topológicos, T_1 es equivalente a T_2 , con lo cual si G fuera un grupo topológico con la topología Zariski, entonces sería de dimensión 0.

Trasladar por un elemento $y \in G$, i.e. $x \mapsto xy$, es un isomorfismo de variedades algebraicas $G \rightarrow G$, entonces todas las propiedades geométricas que sucedan en un punto de G se transfieren a cualquier otro punto al hacer variar y . Por ejemplo, como G tiene algún punto suave (el conjunto G_{reg} es un abierto denso de G por [Mon23, Teorema 2.13.12.]), todos los puntos de G son suaves, es decir, G es suave.

Definimos un **isomorfismo** de grupos algebraicos G y G' , como un isomorfismo de variedades algebraicas $\varphi : G \rightarrow G'$ el cual es a su vez un isomorfismo de grupos. Así, un **automorfismo** de G es un isomorfismo de G en G . A partir de ahora nos concentraremos en el caso en el cual la estructura de variedad de G sea afín, y seguiremos llamandolá “grupo algebraico”.

Ejemplo 5.1. El **grupo aditivo** \mathbb{G}_a es la recta afín \mathbb{A}^1 con la estructura de grupo dada por la suma $\mu(x, y) = x + y$ y $\iota(x) = -x$. El **grupo multiplicativo** \mathbb{G}_m es el abierto afín $k^\times \subset \mathbb{A}^1$ con la estructura de grupo dada por la multiplicación $\mu(x, y) = xy$ y $\iota(x) = x^{-1}$. Notar que ambos grupos son variedades irreducibles de dimensión 1.

Más en general, \mathbb{A}^n es un grupo algebraico con la estructura aditiva.

Ejemplo 5.2. Sea $\text{GL}_n(k)$ el conjunto de todas las matrices invertibles con coeficientes en k y de tamaño $n \times n$. Es un grupo con la multiplicación de matrices, y se lo suele llamar el **grupo general lineal**. El conjunto $M_n(k)$ de las matrices con coeficientes en k y de tamaño $n \times n$ puede ser identificado con \mathbb{A}^{n^2} , y $\text{GL}_n(k)$ con el abierto principal definido por la función polinomial \det . Así, visto como una variedad afín, $\text{GL}_n(k)$ tiene su álgebra de funciones regulares generada por las restricciones de las n^2 funciones coordenada T_{ij} junto con $1/\det(T_{ij})$. Claramente la multiplicación e inversión de matrices son morfismos de variedades algebraicas, y por lo tanto $\text{GL}_n(k)$ es un grupo algebraico.

Observación 5.3. Un subgrupo cerrado de un grupo algebraico es nuevamente un grupo algebraico.

Demostración. Sea $H \leq G$ un subgrupo cerrado para la topología Zariski de un grupo algebraico G , entonces H tiene una estructura de variedad inducida por G . Más aún, los morfismos $\mu : G \times G \rightarrow G$ y $\iota : G \rightarrow G$ se restringen y corestringen a $H \times H \rightarrow H$ y $H \rightarrow H$, respectivamente, y siguen siendo morfismos regulares. \square

Gracias a esta observación, podemos construir más ejemplos de grupos algebraicos:

Ejemplo 5.4. El grupo de **matrices triangulares superiores** (análogamente las triangulares inferiores) $T_n(k)$ es el conjunto de ceros en $\text{GL}_n(k)$ de los polinomios T_{ij} con $i > j$. También tenemos los subgrupos $D_n(k)$ y $U_n(k)$ de las matrices diagonales y las matrices triangulares superiores con entradas 1 en la diagonal son cerrados de $\text{GL}_n(k)$. En efecto, como recién, las matrices diagonales es el conjunto de ceros de T_{ij} con $i \neq j$ y las matrices de $U_n(k)$ son los ceros de T_{ij} con $i > j$ y $T_{ii} - 1$.

Observación 5.5. El **producto directo** de finitos grupos algebraicos es nuevamente un grupo algebraico con la topología producto Zariski y la estructura de grupo dada por el producto cartesiano de grupos.

Demostración. Veamos solo el caso de producto de dos grupos algebraicos G_1, G_2 , el caso general se sigue por inducción. Solo tenemos que probar que

$$\begin{array}{ccc} \mu : G_1 \times G_2 \times G_1 \times G_2 & \longrightarrow & G_1 \times G_2 \\ ((x_1, x_2), (y_1, y_2)) & \longmapsto & (x_1 y_1, x_2 y_2) \end{array}, \quad \begin{array}{ccc} \iota : G_1 \times G_2 & \longrightarrow & G_1 \times G_2 \\ (x_1, x_2) & \longmapsto & (x_1^{-1}, x_2^{-1}) \end{array}$$

son morfismos regulares. Pero por la propiedad universal del producto de variedades (ver [Mon23, Teorema 2.6.5.]) basta ver que estos mapas son regulares cuando componemos por la proyección a la primera o segunda coordenada. Esto es obvio, pues G_1 y G_2 son grupos algebraicos, con lo cual sus respectivos mapas μ y ι son regulares. \square

Finalmente, mencionamos algunos otros nombres de grupos algebraicos clásicos: el **grupo especial lineal** $\mathrm{SL}_n(k)$ de matrices de $\mathrm{GL}_n(k)$ con determinante 1 (es el conjunto de ceros de $\det(T_{ij}) - 1$); el **grupo simpléctico** $\mathrm{Sp}_{2n}(k)$ dada por las matrices $x \in \mathrm{GL}_{2n}(k)$ tales que ${}^t x \begin{pmatrix} 0 & J \\ -J & 0 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} 0 & J \\ -J & 0 \end{pmatrix}$, donde J es la matriz de tamaño $n \times n$ que tiene 1 en la antidiagonal y ceros en el resto de los lugares, y ${}^t x$ es la matriz transpuesta de x (es el conjunto de ceros dada por ciertas condiciones polinomiales en x); el **grupo especial ortogonal**

$\mathrm{SO}_{2n+1}(k)$ que en $\mathrm{Char} k \neq 2$ consiste de las matrices $x \in \mathrm{SL}_{2n+1}(k)$ tales que ${}^t x s x = s$, donde $s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J \\ 0 & J & 0 \end{pmatrix}$,

y también exist otro **grupo especial ortogonal** $\mathrm{SO}_{2n}(k)$ dada por ${}^t x s x = s$, donde ahora $s = \begin{pmatrix} 0 & J \\ J & 0 \end{pmatrix}$ si $\mathrm{Char} k \neq 2^1$.

6. LA COMPONENTE DE LA IDENTIDAD

Sea G un grupo algebraico. Afirmamos que una sola componente irreducible de G (como variedad algebraica) puede pasar por 1. En efecto, sea X_1, \dots, X_m las componentes distintas que contengan a 1. La imagen de la variedad irreducible $X_1 \times \dots \times X_m$ en G bajo el morfismo producto es un subconjunto irreducible $X_1 \cdots X_m$ de G , que vuelve a contener a e . Por lo tanto $X_1 \cdots X_m$ está contenido en algún X_i . Por otro lado, claramente todas las componentes X_1, \dots, X_m están contenidas en $X_1 \cdots X_m$. Esto fuerza a que $m = 1$. Con lo cual, la siguiente definición tiene sentido:

Definición 6.1. Sea G un grupo algebraico. Denotamos por G° a la única componente irreducible de G que contiene a 1. La llamaremos **componente de la identidad** de G .

Proposición 6.2. Sea G un grupo algebraico. Entonces:

- (1) G° es un subgrupo normal cerrado de índice finito en G , cuyos coclases son las componentes conexas, como también las componentes irreducibles de G .
- (2) Todo subgrupo cerrado de índice finito de G contiene a G° .

Demostración. (1) Para cada $x \in G^\circ$, $x^{-1}G^\circ$ es una componente irreducible de G que contiene a 1, luego por unicidad $x^{-1}G^\circ = G^\circ$. Es decir, $G^\circ = (G^\circ)^{-1}$ y por lo tanto $G^\circ G^\circ = G^\circ$, i.e., G° es un subgrupo cerrado (es una componente irreducible) de G . Para todo $x \in G$, nuevamente $xG^\circ x^{-1}$ es una componente irreducible de G que contiene a 1, con lo cual la unicidad fuerza a que $xG^\circ x^{-1} = G^\circ$, i.e., G° es normal en G . Sus coclases a izquierda o derecha son traslaciones de G° , y por lo tanto deben ser componentes irreducibles de G ; solamente puede haber un número finito de estos (G es un espacio Noetheriano; ver [Mon23, Teorema 2.8.9.]), en particular G° tiene índice finito. Como estos conjuntos son disjuntos, deben ser también componentes conexas de G , ya que los conjuntos irreducibles en un espacio topológico son conexos, y al ser finitos cerrados (son componentes irreducibles) disjuntos también son abiertos.

- (2) Si H es un subgrupo cerrado de índice finito en G , entonces cada uno de sus finitas coclases a izquierda son también cerrados, con lo cual la unión de los coclases distintos de H también lo es. Como el complemento de un cerrado es abierto, tenemos que H es abierto. Consecuentemente, las coclases a izquierda de H particionan G° en una unión finita de abiertos-cerrados, como G° es conexo e interseca H , debe ser que $G^\circ \subset H$.

\square

¹En general los grupos simpléctico y especial ortogonales surgen geoméricamente de grupos de transformaciones lineales que preservan ciertas formas bilineales, pero en característica $\mathrm{Char} k = 2$ hay que tener cierto cuidado al definirlos, cf [Die56], [Car89, Ch. 1].

Esto motiva a la siguiente definición:

Definición 6.3. Diremos que un grupo algebraico es **conexo**² si $G = G^\circ$.

Ejemplo 6.4. La mayoría de los grupos algebraicos que hemos mencionado son conexos: \mathbb{G}_a , \mathbb{G}_m , $\mathrm{GL}_n(k)$, $\mathrm{SL}_n(k)$. Que $\mathrm{GL}_n(k)$ es conexo es consecuencia de ser un abierto principal del espacio afín \mathbb{A}^{n^2} . Sin embargo, probar tanto que $\mathrm{SL}_n(k)$ como otros grupos clásicos son conexos no se deduce trivialmente de la definición de estos grupos (ver [Hum12, (7.5)]).

7. SUBGRUPOS Y HOMOMORFISMOS

Usaremos en esta sección un lema útil:

Lema 7.1. Sean U, V dos abiertos densos de un grupo algebraico G . Entonces $G = UV$.

Demostración. Como invertir es un isomorfismo de variedades, V^{-1} es un abierto denso de G ; similarmente, las traslaciones xV^{-1} con $x \in G$ son abiertos densos. Por lo tanto U interseca xV^{-1} , forzando a que $x \in UV$. Como $x \in G$ era arbitrario se tiene el lema. \square

Definición 7.2. Un **morfismo de grupos algebraicos** es un homomorfismo de grupos $\varphi : G \rightarrow G'$ que también es un morfismo de variedades algebraicas.

Proposición 7.3. Sea H un subgrupo de un grupo algebraico G , sea \overline{H} su clausura en la topología Zariski. Entonces:

- (a) \overline{H} es un subgrupo de G . En particular, como es cerrado es un subgrupo algebraico de G .
- (b) Si H es constructible³, entonces $H = \overline{H}$.
- (c) Más en general, si $\varphi : G \rightarrow G'$ es un morfismo de variedades algebraicas y H es un subgrupo constructible de G , entonces $\varphi(H)$ es cerrado en G' (en particular, como los cerrados de G son constructibles, φ es cerrado).

Demostración. (a) Como invertir es un isomorfismo de variedades, $\overline{H}^{-1} = \overline{H^{-1}} = \overline{H}$. Similarmente, trasladar por $x \in H$ es un isomorfismo de G , por lo tanto $x\overline{H} = \overline{xH} = \overline{H}$, es decir, $H\overline{H} \subset \overline{H}$. Similarmente $\overline{H}H \subset H$. Esto prueba que \overline{H} es un grupo.

- (b) Si H es constructible, contiene un conjunto $U \cap V$ con U abierto (no vacío) y V cerrado, entonces $W := U \cap V \subset \overline{H}$ es un abierto denso de \overline{H} . Por el ítem (a) sabemos que \overline{H} es un grupo algebraico, y por el lema de arriba $\overline{H} = WW \subset HH = H$.
- (c) Sea $H' := \varphi(H)$, es un subgrupo de G' . El Teorema de Chevalley probado en la entrega de ejercicios del curso MAT426 dice que H' es constructible. Luego el ítem (b) implica que H' es cerrado. \square

Corolario 7.4. Sean A, B subgrupos cerrados de un grupo algebraico G . Si B normaliza⁴ A , entonces AB es un subgrupo cerrado de G .

Demostración. Como $B \subset N_G(A)$, AB es un subgrupo de G . Como $A \times B$ es un subgrupo cerrado, en particular constructible en $G \times G$, el ítem (c) de la proposición de arriba dice que la imagen AB del morfismo de grupos $\mu : G \times G \rightarrow G$ es cerrado en G . \square

Proposición 7.5. Sea $\varphi : G \rightarrow G'$ un morfismo de grupos algebraicos. Entonces:

- (a) $\mathrm{Ker} \varphi$ es un subgrupo cerrado de G .
- (b) $\mathrm{Im} \varphi$ es un subgrupo cerrado de G' .
- (c) $\varphi(G^\circ) = \varphi(G)^\circ$.
- (d) $\dim G = \dim \mathrm{Ker} \varphi + \dim \mathrm{Im} \varphi$.

Demostración. (a) Como φ es continuo y el $\mathrm{Ker} \varphi$ es por definición la preimagen del conjunto cerrado $\{1\}$, entonces $\mathrm{Ker} \varphi$ es cerrado. Ya sabemos que es un subgrupo.

- (b) $\varphi(G)$ es un subgrupo de G' . Como G es trivialmente constructible en G , el ítem (c) de la proposición de arriba implica que la imagen es cerrada.

²El uso del término “irreducible” tiene reservado un significado totalmente distinto en el contexto de grupos lineales y representaciones de grupos.

³Unión finita de conjuntos $U \cap V$ con U abiertos y V cerrado.

⁴Es decir, $B \subset N_G(A)$.

- (c) $\varphi(G^\circ)$ es cerrada por el ítem (c) de la proposición de arriba (G° es cerrado en G , en particular constructible) y es conexo (G° es conexo), como contiene al 1, debe estar contenido en $\varphi(G)^\circ$ (esta notación cobra sentido pues el ítem (b) dice que la imagen de φ es una subvariedad algebraica de G'), ya que las coclases de $\varphi(G)^\circ$ son las componentes conexas de $\varphi(G)$ (ítem (1) de la Proposición 6.2). Por otro lado, como G° tiene índice finito en G , $\varphi(G^\circ)$ tiene índice finito en $\varphi(G)$, con lo cual contiene a $\varphi(G)^\circ$, i.e., $\varphi(G^\circ) = \varphi(G)^\circ$, por el ítem (b) de la Proposición 6.2.
- (d) EL Teorema ?? nos dice que para casi todo $x \in \varphi(G)$, $\dim G - \dim \varphi(G) = \dim \varphi^{-1}(x)$. Pero todas las fibras $\varphi^{-1}(x)$ tienen la dimensión de $\text{Ker } \varphi$, y se sigue la afirmación. En efecto, $\varphi^{-1}(x) = x \text{Ker } \varphi$, y trasladar por x es un isomorfismo de variedades. Como las componentes irreducibles de G son traslaciones de Γ° (ítem (a) de la Proposición 6.2), y trasladar es un isomorfismo de variedades algebraicas, tenemos que $\dim G = \dim G^\circ$ y $\dim \varphi(G) = \dim \varphi(G)^\circ$, por lo tanto el ítem anterior nos permite restringirnos a $\varphi|_{G^\circ} : G^\circ \twoheadrightarrow \varphi(G)^\circ$, con lo cual podemos suponer que φ es sobreyectiva y que G y G' son variedades irreducibles. El ítem (c) de la proposición de arriba dice que φ es cerrado, por lo que podemos rematar la demostración utilizando [Mon23, Teorema 2.12.13.]:

Sea $f : X \rightarrow Y$ un morfismo regular sobreyectivo y cerrado entre variedades algebraicas. Supongamos que

- (i) Y es irreducible, y que
 - (ii) Todas las fibras de f son irreducibles de la misma dimensión $d \in \mathbb{N}$.
- Entonces, X es irreducible y $\dim(X) = \dim(Y) + d$.

□

Ejemplo 7.6. Consideremos el morfismo de grupos algebraicos $\varphi = \det : \text{GL}_n(k) \rightarrow \text{GL}_1(k)$ sobreyectivo y el núcleo es $\text{SL}_n(k)$. Por el ítem (d) del corolario de arriba, tenemos que $\dim \text{SL}_n(k) = n^2 - 1$ (la dimensión de $\text{GL}_n(k)$ es n^2 pues es un abierto de \mathbb{A}^{n^2}).

Observación 7.7. Dado un k -espacio vectorial n -dimensional V , podemos fijar una base de V e identificar al grupo transformaciones lineales invertibles $\text{GL}(V)$ de V con el grupo de matrices $\text{GL}_n(k)$, y hacerle heredar la estructura de grupo algebraico proveniente del grupo general lineal; llamemos **topología Zariski** a esta topología en $\text{GL}(V)$. Como cambiar de base en k^n corresponde con aplicar un automorfismo $x \mapsto yxy^{-1}$ en $\text{GL}_n(k)$, la topología Zariski de $\text{GL}(V)$ no depende de la base de V elegida.

Un resultado útil para probar que algunos grupos algebraicos son grupos conexos, es el siguiente:

Proposición 7.8. Sea G un grupo algebraico, Y_i con $i \in I$ una familia de subgrupos conexos y cerrados de G que lo generan como grupo. Entonces G es conexo.

Demostración. La demostración de este resultado se obtiene como corolario de [Hum12, Proposición §7.5]. □

Ejemplo 7.9. Se tiene entonces que $\text{SL}_n(k)$ y $U_n(k)$ son grupos conexos. En efecto, el primero está generado por los subgrupos U_{ij} con $i \neq j$, donde U_{ij} consiste de las matrices con 1 en la diagonal, una entrada arbitraria en la posición (i, j) , y ceros en el resto; similarmente, el segundo grupo está generado por los U_{ij} con $i < j$. Notar que U_{ij} es isomorfo como grupo algebraico a \mathbb{G}_a pues la multiplicación de matrices se convierte en $(k, +)$ en la coordenada (i, j) , i.e., U_{ij} es conexo.

8. ACCIONES DE GRUPOS ALGEBRAICOS SOBRE VARIEDADES

Definición 8.1. Sea G un grupo algebraico y X una variedad algebraica. Supongamos que tenemos una acción del grupo subyacente G en el conjunto X , digamos $\varphi : G \times X \rightarrow X$ de tal suerte que es un morfismo de variedades algebraicas (el dominio es la variedad producto), entonces decimos que G **actúa mórficamente** en X (o cuando no haya confusión, diremos simplemente que actúa en X).

Si G actúa mórficamente sobre dos variedades algebraicas X, Y , decimos que un morfismo $f : X \rightarrow Y$ es **G -equivariante** si $f(g \cdot x) = g \cdot f(x)$ para todo $g \in G$ y $x \in X$.

Proposición 8.2. Sea un grupo algebraico G actuando mórficamente en una variedad algebraica X . Sean Y, Z subconjuntos de X con Z cerrado. Entonces:

1. $\text{Tran}_G(Y, Z)$ es cerrado en G .
2. Para cada $x \in X$, G_x es un subgrupo cerrado de G ; en particular G_S es cerrado para todo $S \subset X$.
3. El conjunto de puntos fijos de $g \in G$ es cerrado en X ; en particular, X^G es cerrado.
4. Si G es un grupo algebraico conexo, entonces estabiliza cada componente irreducible de X , en particular actúa trivialmente en X si este es finito.

Demostración. 1. Para cada $x \in X$, tenemos el mapa de la órbita de x , es decir

$$\begin{aligned}\varphi_x : G &\longrightarrow X \\ g &\longmapsto g \cdot x,\end{aligned}$$

el cual es la composición de $g \mapsto (g, x)$ con φ , y por lo tanto es un morfismo de variedades algebraicas. Como

$$\text{Tran}_G(Y, Z) = \bigcap_{x \in Y} \varphi_x^{-1}(Z)$$

es la intersección de cerrados, es cerrado en G .

2. Como $G_x = \text{Tran}_G(\{x\}, \{x\})$, G_x es cerrado de G por el ítem anterior. Así, $G_S = \bigcap_{x \in S} G_x$ también es cerrado.
3. Sea $g \in G$, consideremos el morfismo algebraico $\psi : X \rightarrow X \times X$ dado por $x \mapsto (x, g \cdot x)$. El conjunto de puntos fijos X^g es precisamente la preimagen de la diagonal vía ψ , la cual es cerrada porque X es una variedad algebraica, luego X^g es cerrado.
4. Supongamos que G es un grupo conexo. El estabilizador H en G de una componente irreducible de X es cerrada por el primer ítem, además es un subgrupo de G . Como G permuta estas finitas componentes de X , H tiene índice finito en G . Con lo cual el ítem (2) de la Proposición 6.2 implica que $H = G$. \square

Corolario 8.3. *Sea G un grupo algebraico, y H un subgrupo cerrado. Entonces $N_G(H)$ y $C_G(H)$ son subgrupos cerrados; también lo es $C_G(g)$, para cualquier $g \in G$.*

Demostración. Para probar que $C_G(H)$ o $C_G(x)$ son cerrados, basta aplicar el ítem 2. de la proposición de arriba, simplemente hay que considerar la acción mórlica de G en si mismo por automorfismos internos. Para $N_G(H)$, aplicamos el ítem 1. y el hecho de que $N_G(H) = \text{Tran}_G(H, H)$ vía esta acción. En efecto, el automorfismo Int_x con $x \in G$ manda H a un subgrupo cerrado de G , de la misma dimensión que H (es un isomorfismo de variedades algebraicas), y la componente de la identidad tiene índice $[H : H^\circ]$. Con lo cual Int_x manda H inyectivamente en H si y solo si manda H sobreyectivamente a H . En otras palabras, $x \in N_G(H)$ si y solo si $x \in \text{Tran}_G(H, H)$. \square

8.1. Órbitas cerradas.

Proposición 8.4. *Sea G un grupo algebraico actuando mórlicamente en una variedad algebraica X . Entonces cada órbita es un subconjunto suave localmente cerrado de X , cuya frontera es la unión de algunas órbitas con dimensión estrictamente menor. En particular, las órbitas de dimensión minimal son cerradas (y por lo tanto existen órbitas cerradas).*

Demostración. Sea $Y := G \cdot y$ la órbita de $y \in X$. Como la imagen de G bajo el mapa de la órbita $\varphi_y : G \rightarrow X$, Y es constructible, luego el Teorema de Chevalley dice que existe un abierto denso de \bar{Y} . Como G actúa transitivamente en Y (dejando \bar{Y} estable), Y tiene que ser suave (existe almenos un punto suave y podemos trasladarlo a cualquier punto de Y), así Y es suave y contiene un abierto de \bar{Y} en cada uno de sus puntos (trasladando), luego Y es abierto en \bar{Y} . Por lo tanto $\bar{Y} \setminus Y$ es cerrado y de dimensión estrictamente menor que \bar{Y} . Como es G -estable, esta fronte es justamente la unión de las otras G -órbitas. \square

8.2. **Traslación de funciones.** Es interesante notar que dado un grupo algebraico G actuando sobre una variedad afín X , entonces G actúa naturalmente sobre $\Gamma = \Gamma(X, \mathcal{O}_X)$:

$$\begin{aligned}L_g : \Gamma &\longrightarrow \Gamma & R_g : \Gamma &\longrightarrow \Gamma \\ f &\longmapsto L_g(f)(y) = f(g^{-1} \cdot x), \forall x \in X & f &\longmapsto R_g(f)(y) = f(x \cdot g), \forall x \in X\end{aligned}$$

para cualquier $g \in G$ fijo. A la función L_g la llamamos **traslación a izquierda** y a R_g **traslación a derecha** (por g). Así, $g \mapsto L_g$ y $g \mapsto R_g$ son acciones de G en Γ . Estas operaciones son importantes, por ejemplo caracterizan contención en un subgrupo cerrado:

Proposición 8.5. *Sea H un subgrupo cerrado de un grupo algebraico afín G . Sea I el ideal de $\Gamma(G, \mathcal{O}_G)$ de las funciones regulares de G que se anulan en H . Entonces $H = \{g \in G \mid R_g(I) \subset I\}$.*

Demostración. Por un lado, si $g \in H$ y $f \in I$, entonces $L_g(x) = f(x \cdot g) = 0$ para todo $x \in H$ pues H es cerrado por el producto, i.e., $L_g(f) \in I$. Por otro lado, si $L_g(I) \subset I$, se tiene que $L_g(f)$ se anula en $1 \in H$ para todo $f \in I$, es decir, $f(g) = 0$, consecuentemente, $g \in \bar{H} = H$. \square

8.3. **Linearización de grupos afines.** Habíamos observado (5.3) que todo subgrupo cerrado de $\mathrm{GL}_n(k)$ es un grupo algebraico (afín). Sin embargo, vale también la recíproca cuando G es afín: construiremos un subespacio de dimensión finita de $\Gamma := \Gamma(G, \mathcal{O}_G)$, en el cual G actuará por traslación. Antes necesitamos algunos resultados preliminares:

Proposición 8.6. *Sea G un grupo algebraico actuando afín mórficamente en una variedad afín X , y sea V un subespacio de dimensión finita de $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$. Entonces:*

- (a) *Existe un subespacio de dimensión finita W de $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$ conteniendo a V , el cual es estable por traslaciones L_g , $g \in G$.*
- (b) *V es estable por la acción de los L_g , $g \in G$ si y solo si $\psi^*(V) \subset \Gamma \otimes_k V$, donde $\psi : G \times X \rightarrow X$ está dada por $\psi(g, x) := g^{-1} \cdot x$.*
- (c) *Valen los ítems (a) y (b) cambiando L_g por R_g , y cambiando ψ por $\nu : X \times G \rightarrow X$ dada por $\nu(x, g) = x \cdot g$.*

Demostración. (a) Sin pérdida de generalidad podemos suponer que V es 1-dimensional y está generado por un solo elemento $f \in \Gamma(X, \mathcal{O}_X)$, pues podemos sumar los subespacios W obtenidos. Escribamos $\psi^*(f) = \sum_i f_i \otimes g_i \in \Gamma \otimes_k \Gamma(X, \mathcal{O}_X)$. Para cada $g \in G$, $x \in X$, tenemos $L_g(f)(x) = f(g^{-1} \cdot x) = \sum_i f_i(g)g_i(x)$, y por lo tanto $L_g f = \sum_i f_i(g)g_i$. Las funciones g_i por lo tanto genera un subespacio de dimensión finita de $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$, el cual contiene a f . Así, podemos tomar W como el generado por los $L_g f$ funciona.

- (b) Si $\psi^*V \subset \Gamma \otimes_k V$, entonces inspeccionando la demostración del ítem anterior vemos que las funciones g_i pueden tomarse en V , es decir, V es estable bajo los L_g , $g \in G$. Recíprocamente, sea V estable por estas traslaciones, y extendamos una base $\{f_i\}_i$ del espacio vectorial V a una base $\{f_i\}_i \cup \{g_j\}_j$ de $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$. Escribiendo $\psi^*f = \sum_i r_i \otimes f_i + \sum_j s_j \otimes g_j$, se sigue que $L_g f = \sum_i r_i(g)f_i + \sum_j s_j(g)g_j$. Como $L_g f$ pertenece a V , las funciones s_j deben anularse en G (y por lo tanto son cero porque k es algebraicamente cerrado), es decir, $\psi^*V \subset \Gamma \otimes_k V$.

- (c) La demostración de este hecho es completamente análogo a lo que ya hicimos.

□

Teorema 8.7. *Sea G un grupo algebraico afín. Entonces G es isomorfo a un subgrupo cerrado para algún $\mathrm{GL}_n k$.*

Demostración. Tomemos generadores f_1, \dots, f_n de la k -álgebra finitamente generada Γ . Por el ítem (c) de la proposición anterior, aplicado al subespacio V generado por estos f_i , podemos encontrar un subespacio de dimensión finita W de Γ , estable por las traslaciones R_g con $g \in G$. Cambiando de notación, podemos suponer que los f_i generan una base de W (y también la k -álgebra Γ). Sea $\nu : G \times G \rightarrow G$ dada por $\nu(x, y) = yx$, el ítem (c) de la proposición de arriba, podemos escribir $\nu^*f_i = \sum_j m_{ij} \otimes f_j$, con $m_{ij} \in \Gamma$. Entonces $R_x f_i(y) = f_i(yx) = \sum_j m_{ij}(x)f_j(y)$, por lo tanto $R_x f_i = \sum_j m_{ij}(x)f_j$. En otras palabras, la matriz de $L_x|_W$ relativa a la base (f_1, \dots, f_n) es $(m_{ij}(x))_{ij}$. Esto prueba que

$$\begin{aligned} \sigma : G &\longrightarrow \mathrm{GL}_n(k) \\ x &\longmapsto (m_{ij}(x))_{ij} \end{aligned}$$

es un morfismo de grupos algebraicos ($m_{ij} \in \Gamma$).

Observemos que $f_i(x) = f_i(1 \cdot x) = \sum_j m_{ij}(x)f_j(1)$, i.e., $f_i = \sum_j f_j(1)m_{ij}$. Esto muestra que los m_{ij} generan Γ ; en particular σ es inyectivo. Más aún, la imagen $G' := \sigma(G)$ es un subgrupo cerrado en $\mathrm{GL}_n(k)$ por el ítem (b) de la Proposición 7.5. Finalmente, nos resta probar que σ es un isomorfismo de variedades algebraicas. Pero la restricción a G' de las funciones coordenada T_{ij} son enviadas vía σ^* a los m_{ij} respectivos, los cuales generan Γ . Luego σ^* es sobreyectivo, e induce un isomorfismo de k -álgebras entre $\Gamma(G', \mathcal{O}_{G'})$ y Γ . □

9. GRUPOS SOLUBLES Y NILPOTENTES

10. RESUMEN DE VARIEDADES COMPLETAS

Definición 10.1. Decimos que una variedad algebraica (o simplemente variedad) X es **completa**, si para toda variedad algebraica Y , la proyección a la segunda coordenada

$$\begin{aligned} \mathrm{pr}_Y : X \times Y &\longrightarrow Y \\ (x, y) &\longmapsto y \end{aligned}$$

es una función *cerrada*.

Proposición 10.2. (a) *Una subvariedad cerrada de una variedad completa (respectivamente proyectiva) es completa (respectivamente proyectiva).*

- (b) Si $\varphi : X \rightarrow Y$ es un morfismo (regular) de variedades algebraicas, y X es completo, entonces la imagen es cerrada en Y , y es completa.
- (c) Las variedades afines completas tienen dimensión 0.
- (d) Las variedades proyectivas son completas; las variedades quasiproyectivas completas son proyectivas.
- (e) La variedad bandera de un espacio vectorial V de dimensión finita es proyectiva, y en particular el ítem (d) dice que es completa.

Demostración. (a) Se deduce inmediatamente de la definición de subvariedad cerrada.

- (b) Es exactamente la misma demostración que el Corolario 2.7.10. de [Mon23]; notar que usamos que la variedad algebraica Y es *separada*.
- (c) En efecto, como X es afín, podemos suponer sin pérdida de generalidad que es un cerrado de \mathbb{A}^m para algún $m \geq 1$, luego basta ver que la imagen de cada proyección a la i -ésima coordenada es finita, digamos $f_i : X \rightarrow \mathbb{A}^1$, ahora, considerando la incrustación $\mathbb{A}^1 \hookrightarrow \mathbb{P}^1$, $x \mapsto [x, 1]$, tenemos que por el ítem anterior que la composición $X \rightarrow \mathbb{A}^1 \hookrightarrow \mathbb{P}^1$ tiene imagen cerrada, y como no es sobreyectiva, debe ser finita, i.e., la imagen de f_i es finita como queríamos probar.
- (d) Que las *variedades proyectivas* son completas ya lo vimos en [Mon23, Teorema 2.7.9]. Más generalmente, si X es *quasi-proyectiva*, es decir, isomorfa a un abierto Zariski U de una variedad algebraica proyectiva Y , entonces el morfismo inclusión $U \hookrightarrow Y$ tiene imagen cerrada por el ítem (b), y por lo tanto es una subvariedad cerrada de una variedad proyectiva, y concluimos utilizando el ítem (a).
- (e) Una demostración de que las variedades banderas son proyectivas se puede encontrar en [Gec13, Teorema 3.3.11.].

□

Además de estos hechos, necesitamos un lema:

Lema 10.3. *Supongamos que G actúa transitivamente sobre dos variedades algebraicas irreducibles X, Y , y sea $\varphi : X \rightarrow Y$ un morfismo regular biyectivo, G -equivariante. Si Y es completo, entonces X también.*

Demostración. Ver [Hum12, Lema §21.1.].

□

11. TEOREMA DEL PUNTO FIJO DE BOREL

En esta sección probaremos el teorema principal de este artículo:

Teorema 11.1 (Teorema del punto fijo de Borel). *Sea G un grupo algebraico conexo soluble, y sea X una variedad completa (no vacía) donde actúa G . Entonces G tiene un punto fijo en X .*

Demostración. Si $\dim G = 0$, entonces $G = \{1\}$ y no hay nada que probar. Luego procedemos por inducción en la dimensión de G . Sea $H := [G, G]$, es conexo (ver [Hum12, (17.2)]), soluble, y de menor dimensión que G (pues G es soluble), con lo cual, por hipótesis inductiva, el conjunto Y de puntos fijos de H en X es no vacío. Y es cerrado (ver [Hum12, Proposición 8.2.]), con lo cual es completo por el ítem (a) de la Proposición 10.2. Como G deja estable a Y , ya que H es normal en G , basta ver que G tiene un punto fijo en Y , así, reemplacemos X por Y .

Estamos entonces en el siguiente caso: $H \subset G_x$ para todo $x \in X$. En particular, todos los *grupos de isotropía* son normales en G , por lo tanto G/G_x es una variedad *afín*. Que los grupos de isotropía son normales se deducen de lo siguiente, esto equivale a probar que para todo $g \in G$, $G_x \subset gG_xg^{-1}$, luego sea $z \in G_x$, i.e., $z \cdot x = x$, tenemos que $g^{-1}zg z^{-1} \in H \subset G_{z \cdot x}$, consecuentemente $x = z \cdot x = g^{-1}zg z^{-1}(z \cdot x) = g^{-1}zg \cdot x$, i.e. $g^{-1}zg \in G_x$, o sea, $z \in gG_xg^{-1}$, como z era arbitrario se prueba la inclusión deseada.

Tomemos $x \in X$ cuya órbita $G \cdot x$ sea cerrada, y por lo tanto nuevamente completo: esto se puede hacer, por [Hum12, Proposición 8.3.]. Ahora el morfismo canónico $G/G_x \rightarrow G \cdot X$ es biyectivo, con el lado izquierdo afín y el derecho completo. El Lema 10.3 implica que G/G_x es completo. Pero el ítem (c) de 10.2 implica que G/G_x es un grupo algebraico 0-dimensional, i.e. trivial, es decir, $G_x = G$, y por lo tanto x es un punto fijo. □

12. CONSECUENCIAS

En esta sección probaremos varias consecuencias el Teorema del punto fijo de Borel. Sea G un grupo conexo arbitrario.

El siguiente teorema es un análogo del Teorema de Lie⁵; esto vale en característica arbitraria, sin embargo el teorema para álgebras de Lie no⁶.

Teorema 12.1 (Teorema de Lie-Kolchin). *Sea G un subgrupo algebraico conexo soluble de $\mathrm{GL}(V)$ para un espacio vectorial de dimensión finita no trivial. Entonces existe una bandera $V = V_0 \supset V_1 \supset \cdots \supset V_n = 0$ de subespacios G -invariantes con $\mathrm{codim} V_i = i$. En particular, V_{n-1} es 1-dimensional, y por lo tanto contiene un vector v que es autovector simultáneo de cada g para todo $g \in G$.*

Demostración. Sea G un subgrupo cerrado conexo soluble de $\mathrm{GL}(V)$. Entonces G actúa en la variedad bandera de V , la cual es completa por el ítem (e) de la Proposición 10.2, con lo cual el Teorema 11.1 implica que la acción de G deja fija una bandera

$$V = V_n \supset \cdots \supset V_1 \supset V_0 = 0.$$

Es decir, vale el enunciado del teorema. \square

12.0.1. *Subgrupos de Borel y Toros maximales.*

Definición 12.2. Un **subgrupo de Borel** de G es un subgrupo cerrado conexo soluble maximal.

Como los subgrupos de Borel de G y G° coinciden, supondremos a partir de lo que sigue que G es conexo. Un subgrupo conexo soluble de dimensión máxima en G es claramente un subgrupo de Borel; pero no es obvio que todo subgrupo de borel tenga la misma dimensión, sin embargo, esto es cierto:

Teorema 12.3. *Sea B un subgrupo de borel de G . Entonces G/B es una variedad proyectiva, y todos los otros subgrupos de borel son conjugados a B . En particular, son todos isomorfos entre sí y tienen la misma dimensión.*

Demostración. Sea S un subgrupo de Borel de dimensión máxima. Representemos a G en $\mathrm{GL}(V)$ con un subespacio 1-dimensional V_1 cuyo estabilizador en G es precisamente S (ver [Hum12, Teorema 11.2]). La acción inducida de S en V/V_1 es *trigonalizable* por el Teorema 12.1, con lo cual existe una bandera *completa* $0 \subset V_1 \subset \cdots \subset V$ estabilizada por S , llamémosla f . De hecho, S es el grupo de isotropía de f en G , por cómo elegimos V_1 . Con lo cual el morfismo inducido de G/S sobre la órbita de f en la variedad bandera de V es biyectiva. Por otro lado, el estabilizador de toda variedad bandera es soluble y por lo tanto tiene dimensión no mayor a $\dim S$. Consecuentemente, la órbita de f tiene la dimensión más chica posible, por lo tanto es cerrado (ver [Hum12, (8.3)]). Así, la órbita es completa por los ítems (a) y (e) de la Proposición 10.2. Esto fuerza a que G/S sea completo por el Lema 10.3, o sea, es proyectivo por el ítem (d) de 10.2.

Ahora tomemos un subgrupo de Borel B , este actúa por multiplicación a izquierda en la variedad completa G/S . Luego el Teorema 11.1 implica que deja fijo un punto xS , es decir, $BxS = xS$, equivalentemente, $x^{-1}Bx \subset S$. Como ambos son subgrupos de Borel, concluimos que $x^{-1}Bx = S$ por maximalidad. Esto concluye ambas afirmaciones del teorema. \square

Corolario 12.4. *Los toros maximales (respectivamente los subgrupos conexos unipotentes maximales) de G son los de los subgrupos de Borel de G , y son todos conjugados. En particular tienen la misma dimensión.*

Demostración. Sea T un toro maximal de G , U un subgrupo conexo unipotente maximal. Evidentemente T está incluido en algún subgrupo de borel B , entonces es un toro maximal de B , y por lo tanto todos los demás toros maximales de B son conjugados a T en B (ver [Hum12, Teorema 19.3]). Similarmente, U yace contenido en algún subgrupo de borel B' , con $U = B'_u$ por maximalidad. Como todos los subgrupos de Borel de G son conjugados, el corolario se sigue. \square

Definición 12.5. A la dimensión de cualquier toro maximal de G se le dice el **rango** de G .

Ejemplo 12.6. El rango de $\mathrm{SL}_n(k)$ es $n - 1$.

Definición 12.7. Decimos que un subgrupo cerrado P de G es **parabólico**, si el espacio homogéneo G/P es proyectivo (equivalentemente completo por el ítem (d) de 10.2).

⁵Este teorema dice que sobre un cuerpo algebraicamente cerrado de característica cero, si $\mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(V)$ es una representación de dimensión finita de una álgebra de Lie *soluble* \mathfrak{g} , entonces existe una *bandera* $V = V_0 \supset V_1 \supset \cdots \supset V_n = 0$ de subespacios \mathfrak{g} -invariantes con $\mathrm{codim} V_i = i$. En particular, V_{n-1} es 1-dimensional, y por lo tanto contiene un vector v que es autovector simultáneo de cada $\pi(g)$ para todo $g \in \mathfrak{g}$.

⁶En característica $p > 0$, el Teorema de Lie vale para representaciones de dimensión menor que p , sin embargo, puede fallar en dimensión p : ver [Wik].

Corolario 12.8. *Un subgrupo cerrado P de G es parabólico si y solo si contiene un subgrupo de Borel. En particular, todo subgrupo conexo H de G es un subgrupo de Borel si y solo si H es soluble y G/H es proyectivo.*

Demostración. Si H es un subgrupo cerrado de G tal que G/H es proyectivo, entonces B deja fijo un punto por el Teorema 11.1, y por lo tanto tiene un conjugado en H , esto fuerza a que $\dim G/H \leq \dim G/B$. Recíprocamente, si H es un subgrupo cerrado incluyendo un subgrupo de Borel B de G , entonces $G/B \rightarrow G/H$ es un morfismo sobreyectivo con dominio una variedad completa, forzando a G/H a ser completo (ítem (b) de la Proposición 10.2). Pero G/H es proyectivo (ítem (d) de la Proposición 10.2), ya que todos los espacios homogéneos son quasi-proyectivos por construcción (ver [Hum12, (11.3)]). Esto prueba el Corolario. \square

Ejemplo 12.9. Sea $G = \mathrm{GL}_n(k)$ y $B = T_n(k)$ las matrices triangulares superiores de G . El Teorema de Lie-Kolchin 12.1 dice que B es un subgrupo de Borel de G . En efecto, G/B es justamente la órbita en la variedad bandera de $V = k^n$ de la *bandera standard*. Calculemos los subgrupos parabólicos de G que contienen a B . Si (e_1, \dots, e_n) es la base canónica de k^n , entonces para cada bandera parcial $(e_1, \dots, e_{i(1)}) \subset (e_1, \dots, e_{i(2)}) \subset \dots$, el estabilizador de G es evidentemente un subgrupo cerrado incluyendo a B .

Más concretamente, si $G = \mathrm{GL}_3(k)$, entonces existen solamente dos subgrupos parabólicos propios distintos de B : los dos grupos de matrices de la siguiente forma

$$\begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ 0 & 0 & * \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} * & * & * \\ 0 & * & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}.$$

Corolario 12.10. *Sea $\varphi : G \rightarrow G'$ un epimorfismo de grupos algebraicos conexos. Sea H un subgrupo de Borel (respectivamente un subgrupo parabólico, un toro maximal, o un subgrupo conexo unipotente maximal) de G . Entonces $\varphi(H)$ es un subgrupo de Borel (respectivamente un subgrupo parabólico, un toro maximal, o un subgrupo conexo unipotente maximal) de G' y todos los subgrupos de este tipo en G' se obtienen de esta manera.*

Demostración. Debido a los Corolarios 12.4, 12.8, basta ver que esto vale en el caso $H = B$ subgrupo de Borel de G . Claramente $B' := \varphi(B)$ es conexo y soluble. Pero el mapa natural $G \rightarrow G' \rightarrow G'/B'$ induce un morfismo sobreyectivo $G/B \rightarrow G'/B'$, y por lo tanto G'/B' es completo por el ítem (b) de la Proposición 10.2, es decir, B' es un subgrupo parabólico de G' . El Corolario 12.8 implica luego que es un subgrupo de Borel de G' . Como algún subgrupo de Borel de G' tiene que ser de la forma $\varphi(B)$, se sigue del Teorema 12.3 aplicado a G' que son todos conjugados a $\varphi(B)$, consecuentemente, por sobreyectividad de φ , deben ser de esta forma. \square

12.0.2. Más consecuencias. En esta subsubsección supongamos que G es un grupo algebraico conexo.

Proposición 12.11. *Si σ es un automorfismo de G que deja fijo todos los elementos de un subgrupo de Borel B , entonces debe ser la identidad.*

Demostración. El morfismo

$$\begin{aligned} \varphi : G &\longrightarrow G \\ x &\longmapsto \sigma(x)x^{-1}, \end{aligned}$$

envía B en 1, y por lo tanto se factoriza por la proyección a través del cociente $G \rightarrow G/B$. Por el Teorema 12.3 y el ítem (b) de la Proposición 10.2, $\varphi(G)$ es cerrado (y por lo tanto afín) y completo. Así, es un grupo algebraico 0-dimensional, i.e. $\varphi(G) = \{1\}$. \square

Corolario 12.12.

$$Z(G)^\circ \subset Z(B) \subset C_G(B) = Z(G).$$

Demostración. $Z(G)^\circ$ es conexo y soluble, por lo tanto está contenido en algún subgrupo de Borel de G , el cual podemos conjugar (sin afectar a $Z(G)^\circ$) para convertirlo en B gracias al Teorema 12.3, con lo cual la primera inclusión vale. La segunda inclusión es obvia; también lo es $Z(G) \subset C_G(B)$. Finalmente, si $x \in C_G(B)$, entonces el automorfismo $\sigma : g \mapsto xgx^{-1}$ cumple las hipótesis de la proposición anterior, con lo cual es trivial, i.e., $x \in Z(G)$. \square

Observación 12.13. De hecho, se puede probar que $Z(G) = Z(B)$ (ver [Hum12, Corolario B §22.2.]).

Proposición 12.14. (1) *Si un subgrupo de Borel B es nilpotente (en particular, si $B = B_s$ o $B = B_u$), entonces $G = B$.*

(2) *G es nilpotente si y solo si G tiene un único toro maximal.*

- Demostración.* (1) Observemos primero que si $B = B_s$ o $B = B_u$, entonces B es un toro o un grupo unipotente (ver [Hum12, Teorema 19.3]), y por lo tanto nilpotente en cualquier caso. Siempre que B sea nilpotente, de dimensión positiva, su centro también tiene dimensión positiva ([Hum12, Proposición 17.4 (a)]). Sin embargo, el corolario anterior dice que $Z(G)^\circ \subset Z(B) \subset Z(G)$. Con lo cual, podemos pasar a un grupo de menor dimensión $G/Z(G)^\circ$, en donde $B/Z(G)^\circ$ es un subgrupo nilpotente de Borel. Por hipótesis inductiva, estos grupos son iguales, con lo cual $G = B$ (el caso base $\dim G = 0$ es trivial).
- (2) Sabemos por [Hum12, (19.2)] que un grupo nilpotente tiene un único toro maximal. Recíprocamente, si T es el único toro maximal de G y B es algún subgrupo de Borel conteniéndolo, debe ser que B es nilpotente [Hum12, (19.2)(19.3)], con lo cual $B = G$ por el ítem (1). \square

Corolario 12.15. *Sea T un toro maximal de G , $C := C_G(T)^\circ$. Entonces C es nilpotente y $C = N_G(C)^\circ$.*

Demostración. T es el único toro maximal de C , gracias al Corolario 12.4, entonces C es nilpotente por la proposición que acabamos de probar. Claramente T es normal en $N_G(C)^\circ$, y por lo tanto también central (ver [Hum12, Corolario 16.3]). \square

Definición 12.16. Sea T un toro maximal de G , y $C := C_G(T)^\circ$. El grupo C se lo suele llamar **subgrupo de Cartan**⁷.

Observación 12.17. De hecho, los subgrupos de Cartan son conexos (ver el Teorema [Hum12, §22.3.]). En particular, como todos los toros maximales son conjugados entre sí, los subgrupos de Cartán también lo son.

12.0.3. El Teorema del Normalizador. Nuevamente G es un grupo algebraico conexo.

Primero probamos un lema:

Lema 12.18. *Sea B un subgrupo de Borel de G , sea $N := N_G(B)$. Entonces $B = N^\circ$.*

Demostración. Claramente B es un subgrupo de Borel de N° . Gracias al Teorema 12.3 y al hecho que B es normal en N° , B es el único subgrupo de Borel de N° . Finalmente, [Hum12, Teorema de Densidad §22.2.] fuerza a que B sea igual a N° . \square

Teorema 12.19 (Teorema del Normalizador). *Sea B un subgrupo de Borel de G . Entonces $B = N_G(B)$.*

Demostración. Escribamos $N := N_G(B)$. Por el lema anterior tenemos que $B = N^\circ$. Para probar que $N = B$, procederemos por inducción en $\dim G$. Claramente $R(G)$ yace dentro de todos los subgrupos de Borel de G (cf. [Hum12, Ejercicio 21.6]), así que supongamos que sin pérdida de generalidad que G es de dimensión positiva y *semisimple*: si no, aplicamos hipótesis inductiva a $G/R(G)$.

Sea $x \in N$, y sea T un toro maximal de G contenido en B . Entonces xTx^{-1} es otro toro maximal de G contenido en B , así que existe $y \in B$ tal que $y(xTx^{-1})y^{-1} = T$ (Corolario 12.4). Claramente x pertenece a B si y solo si yx lo es, por lo que podemos asumir también que $x \in N_G(T)$. Tomemos $S := C_T(x)^\circ$, un subtoro T . Hay dos posibilidades:

- Caso 1: $S \neq \{1\}$. Luego $C := C_G(S)$ tiene radical no trivial, con lo cual C es un subgrupo propio de G . Se tiene que $B' := B \cap C$ es un subgrupo de Borel de C (ver [Hum12, §22.4.]). Más aún, C es conexo (ver [Hum12, Teorema 22.3.]). Por hipótesis inductiva, se sigue que $N_C(B') = B'$. Pero x pertenece a C y normaliza B , así que $x \in N_C(B') = B' \subset B$.
- Caso 2: $S = \{1\}$. Como x normaliza T , y T es conmutativo, es fácil de ver que el morfismo conmutador

$$\begin{aligned} \gamma_x : T &\longrightarrow T \\ t &\longmapsto txt^{-1}x^{-1} \end{aligned}$$

es de hecho un morfismo de grupos con núcleo $C_T(x)$. Este es finito, ya que $S = \{1\}$, así que γ_x debe ser sobreyectivo por un argumento de dimensión (ver [Hum12, Proposición 7.4B]). Consecuentemente, T yace dentro de $[M, M]$, donde M es el subgrupo de N generado por x y B . Así, $B = TB_u$ yace contenido en el subgrupo de M generado por B_u y $[M, M]$.

Ahora, tomemos una representación racional $\rho : G \rightarrow \mathrm{GL}(V)$, donde V contiene una recta D cuyo grupo de isotropía en G es precisamente M (ver [Hum12, Teorema 11.2]). Sea $\chi : M \rightarrow \mathbb{G}_m$ su caracter asociado. Entonces χ es trivial en $[M, M]$ y en grupo unipotente B_u ; ergo, χ es trivial en B . Si $0 \neq v \in V$ genera D , se tiene que ρ induce un morfismo $G/B \rightarrow Y =$ la órbita de v bajo la acción de $\rho(G)$. Como

⁷En analogía con las subálgebras de Cartan en Teoría de Álgebras de Lie.

G/B es completo, su imagen Y es cerrada en V (y por lo tanto afín) y también completa gracias al ítem (b) de la Proposición 10.2. Pero esto implica que Y es un punto por el ítem (c) de la Proposición 10.2. Entonces $G = M$. Como G es conexo y $[M : B] < \infty$ (lema anterior), no queda otra alternativa que G sea igual a B , lo cual es imposible. \square

Corolario 12.20. *B es maximal en la colección de subgrupos solubles (no necesariamente conexos o cerrados) de G .*

Demostración. Si S es un subgrupo soluble maximal de G , entonces evidentemente S es cerrado. Si $S \supset B$, entonces $S^\circ = B$ por definición de subgrupo de Borel, consecuentemente $S \subset N_G(B) = B$. \square

Corolario 12.21. *Sea P un subgrupo parabólico de G . Entonces $P = N_G(P)$. En particular, P es conexo.*

Demostración. Por definición, P contiene algún subgrupo de Borel B de G . Sea $x \in N_G(P)$. Entonces tanto B como $x B x^{-1}$ son subgrupos de Borel de P° , y por lo tanto son conjugados por algún elemento $y \in P^\circ$ (Teorema 12.3). Por lo tanto $xy \in N_G(B) = B$ (gracias al Teorema del Normalizador 12.19). Sin embargo, $xy, y \in P^\circ$ fuerza a que $x \in P^\circ$, es decir, $P^\circ = P = N_G(P)$. \square

Corolario 12.22. *Sean P, Q subgrupos parabólicos de G , ambos conteniendo un subgrupo de Borel B . Si P y Q son conjugados en G , entonces $P = Q$.*

Demostración. Supongamos que $Q = x^{-1} P x$. Entonces B y $x^{-1} B x$ son ambos subgrupos de Borel del grupo conexo Q (corolario anterior), así existe $y \in Q$ tal que $B = y^{-1} (x^{-1} B x) y$ (Teorema 12.3). Con lo cual, $xy \in N_G(B) = B$ fuerza que $x \in Q$, y luego $P = Q$. \square

En otras palabras, el corolario anterior dice que la cantidad de clases de conjugación de subgrupos parabólicos de G es precisamente la cantidad de subgrupos parabólicos conteniendo un subgrupo de Borel B de G dado.

Corolario 12.23. *Sea B un subgrupo de Borel de G , y $U = B_u$. Entonces $B = N_G(U)$.*

Demostración. Sea $N := N_G(U)$. Como U es un subgrupo conexo unipotente maximal de N° , contiene un conjugado de cada elemento unipotente de N° (ver [Hum12, Teorema 22.2]). Pero U es normal en N° , o sea que N°/U consiste de elementos semisimples y por ende es un toro (cf. [Hum12, Ejercicio 21.2]). En particular, N° es soluble. Como $B \subset N^\circ$, tenemos que $B = N^\circ$. Sin embargo, $B = N_G(B)$ por el Teorema 12.19, así que $N^\circ = N$. \square

13. COSAS PARA AGREGAR

Suponer que k es un cuerpo algebraicamente cerrado (no necesariamente de característica 0).

Notacion: $Z(G), R(G), C_G(x), C_G(S), [G, G], N_G(x), N_G(S), G_x, G \cdot x, B_u, B_s$

definiciones basicas de grupos: solubilidad, subgrupo normal, nilpotencia, toro maximal, unipotente conexo maximal que es una bandera, que es una bandera completa, una bandera standard (creo que es la bandera de $V = k^n$). Que es un grupo de isotropia. Que es una orbita. Que es el estabilizador. Que es una clase de Conjugación.

definiciones algebraicas: que es un grupo algebraico, que es un grupo algebraico conexo. que es la componente conexa G° . Como es la estructura algebraica de un espacio homogéneo. Que es una acción de un grupo algebraico G en una variedad algebraica X . que es la variedad bandera de un espacio vectorial finito V , dar como ejemplo la acción natural de $GL(V)$ allí. Que es un morfismo de grupos algebraicos.

Teoremas de Humphreys: Teorema 11.2, 11.3, (8.3), Teorema 19.3, 19.2, Proposición 17.4, Corolario 16.3. Proposición 7.4B. No copiar solo citar el Teorema 22.4, el 22.3 y el 22.2.

Hacer una observación para no volver a repetirlo que todo grupo algebraico de dimensión 0 tiene que ser el grupo trivial $\{1\}$.

Ejercicios: 21.5, 21.2

REFERENCIAS

- [Car89] Roger W Carter, *Simple groups of lie type*, vol. 22, John Wiley & Sons, 1989.
- [Die56] Jean Dieudonné, *Groupes de lie et hyperalgèbres de lie sur un corps de caractéristique $p > 0$.*, Bulletin de la Société Mathématique de France **84** (1956), 207–239.
- [Gec13] Meinolf Geck, *An introduction to algebraic geometry and algebraic groups*, Oxford University Press, 2013.
- [Hum12] James E Humphreys, *Linear algebraic groups*, vol. 21, Springer Science & Business Media, 2012.

- [Mon23] Pedro Montero, *Notas de curvas algebraicas (mat426)*, http://pmontero.mat.utfsm.cl/mat426_2023_2.html, 2023, Accedido el 6 de noviembre de 2023.
- [Wik] Wikipedia contributors, *Lie's Theorem*, https://en.wikipedia.org/wiki/Lie%27s_theorem, Accedido el 6 de noviembre de 2023.