



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Estudio del género de las soluciones de una ecuación diferencial en
CP².**

TESIS

que para optar por el grado de
Matemático

PRESENTA:

Luis Felipe López Reyes

DIRECTOR DE TESIS

Laura Ortiz Bobadilla

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice general

1. Introducción	3
2. Preliminares	5
2.1. Ecuaciones diferenciales y foliaciones.	5
2.2. Holonomía local.	9
2.3. Holonomía global.	11
2.4. El plano proyectivo complejo \mathbb{CP}^2	13
2.5. El teorema de linealización de Poincaré.	14
2.6. Explosión de singularidades.	17
2.7. El grado de una foliación de \mathbb{CP}^2	19
3. Las hojas algebraicas de una foliación de \mathbb{CP}^2.	25
3.1. El problema de Poincaré	25
3.2. Escasez de foliaciones con hojas algebraicas.	27
3.3. El teorema de Darboux.	29
4. La familia de grado 4.	31
4.1. La configuración.	32
4.2. La familia de grado 4.	35
4.3. Los puntos singulares de \mathcal{F}_α	37
4.4. La transversalidad de las distintas foliaciones.	41
4.5. El grupo de holonomía global de $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$	44
4.6. El grado de la primera integral de \mathcal{F}_α	46
4.7. El género de las hojas de \mathcal{F}_α	48
4.8. Familias con hojas de género arbitrariamente grande.	51
A. Superficies de Riemann.	55
A.1. Funciones entre superficies de Riemann.	56
A.2. El género de una superficie de Riemann compacta.	57
A.3. Resolución de singularidades y género de una curva algebraica.	58
B. Transformaciones entre toros complejos.	61

Capítulo 1

Introducción

Desde su invención, junto al cálculo diferencial, las ecuaciones diferenciales ordinarias han servido para modelar y describir muchos fenómenos tanto prácticos como teóricos. Este hecho motivo a que durante muchos años se intentará buscar diversos métodos para encontrar soluciones explícitas a dichas ecuaciones. Sin embargo, las ecuaciones diferenciales para las cuales es posible escribir una solución explícita son muy pocas. Es por eso que Henri Poincaré comienza a estudiar las ecuaciones diferenciales desde un punto de vista totalmente distinto. Poincaré intenta obtener información geométrica sobre las soluciones a una ecuación diferencial a partir del campo de vectores que la define. Bajo esta perspectiva (y sobre todo en ecuaciones diferenciables en dos variables) se vuelve muy importante saber si una ecuación diferencial tiene una primera integral. Una primera integral para una ecuación diferencial es una función H cuyas curvas de nivel son parametrizadas por las soluciones a la ecuación diferencial. Esto quiere decir que la función H es constante a lo largo de las soluciones y por ende la podemos pensar como una ley de conservación.

Durante muchos años, por cuestiones de la naturaleza y el poco aceptamiento de los números complejos, el parámetro de las soluciones de una ecuación diferencial era un número real pero con el tiempo se vio la importancia de considerar al parámetro como un número complejo. Así, Poincaré estudia ecuaciones diferenciales holomorfas en el plano proyectivo complejo \mathbb{CP}^2 definidas por campos vectoriales polinomiales y, se pregunta cuando una ecuación diferencial polinomial tiene una primera integral racional, es decir, una función dada por un cociente de polinomios.

En su artículo *Sur l'intégration algébrique des équations différentielles du premier ordre et du premier degré* Poincaré observa que en \mathbb{CP}^2 , una vez que tenemos una cota para el grado de las soluciones algebraicas (*i.e.* soluciones descritas por los ceros de un polinomio) de una ecuación diferencial, el hecho de que la ecuación diferencial tenga una primera integral racional se traduce a saber si una ecuación algebraica tiene solución. Si la ecuación diferencial tiene una primera integral racional todas las soluciones son algebraicas pero, como veremos más adelante, de manera genérica una foliación de \mathbb{CP}^2 no tiene soluciones algebraicas y en consecuencia no puede tener una primera integral racional.

Por lo tanto, se vuelve importante encontrar aquellas ecuaciones diferenciales polinomiales con primera integral racional y, como mencionamos anteriormente, una buena idea puede ser encontrar cotas para el grado de las posibles soluciones algebraicas. A toda ecuación diferencial en \mathbb{CP}^2 es posible asignarle un grado y al problema de acotar el grado de las posibles soluciones algebraicas en términos del grado de la foliación se le conoce como el

problema de Poincaré.

En esta tesis analizaremos un ejemplo debido a Alcides Lins Neto sobre una familia monoparamétrica de ecuaciones diferenciales en $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ de grado fijo tales que, para un subconjunto denso de parámetros A , la ecuación diferencial correspondiente al parámetro $\alpha \in A$ tiene una primera integral racional pero no es posible acotar el grado de las soluciones algebraicas y por lo tanto es un contraejemplo al problema de Poincaré.

Paul Painlevé plantea un problema parecido al de Poincaré, el problema de Painlevé se trata de acotar el género de las soluciones algebraicas en términos del grado de la ecuación diferencial. Como veremos las soluciones de las ecuaciones diferenciales de la familia que Lins Neto plantea son, después de resolver sus singularidades, topologicamente equivalentes a un toro y en consecuencia no son un contraejemplo al problema de Painlevé. Sin embargo, a partir de esta familia es fácil obtener otras familias de grado fijo en las cuales es imposible acotar el género de las soluciones algebraicas y por lo tanto si son un contraejemplo al problema de Painlevé.

Capítulo 2

Preliminares

En todo este trabajo hablaremos de foliaciones holomorfas del plano proyectivo complejo \mathbb{CP}^2 . El propósito de este capítulo es recordar algunas definiciones y resultados importantes.

2.1. Ecuaciones diferenciales y foliaciones.

Sea $U \subset \mathbb{C}^2$ un abierto y $F = (F_1, F_2): U \rightarrow \mathbb{C}^2$ un campo vectorial holomorfo. La ecuación diferencial (autónoma) asociada a F se define como:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= F_1(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= F_2(x, y), \quad t \in \mathbb{C}.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Denotaremos por (\dot{x}, \dot{y}) a $(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt})$.

Una solución de esta ecuación diferencial es una curva parametrizada $\varphi: D \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}^2$ donde D es un conjunto abierto que satisface $\frac{d\varphi(t)}{dt} = F(\varphi(t))$, $\forall t \in D \subset \mathbb{C}$.

Un resultado fundamental en la teoría de ecuaciones diferenciales es el teorema de existencia y unicidad de soluciones. A continuación enunciamos este resultado:

Teorema 2.1.1. [1] *Para cualquier ecuación diferencial (2.1) y todo punto $(x_0, y_0) \in U$ existe un abierto $V \subset U$ y un disco $D_\epsilon = \{|t - t_0| < \epsilon\} \subset \mathbb{C}$, tal que la solución con condición inicial $(x_0, y_0, t_0) \in V \times D_\epsilon$ existe y es única.*

Más aún, la solución depende de manera holomorfa de la condición inicial, y si F depende de manera holomorfa de algunos otros parámetros, la solución también depende de manera holomorfa de éstos parámetros.

El teorema anterior nos asegura que alrededor de cada punto $x \in U$, existe una función analítica $\varphi: V \times D_\epsilon \rightarrow U$ tal que si fijamos $(x_0, y_0) \in V$, $\varphi(x_0, y_0, t)$ es la solución de la ecuación diferencial (2.1) con condición inicial $\varphi(x_0, y_0, 0) = (x_0, y_0)$. A esta función se le suele llamar *flujo de la ecuación diferencial* (2.1).

A pesar de contar con el teorema de existencia y unicidad para ecuaciones diferenciales holomorfas, en principio, un campo vectorial puede ser muy complicado y las soluciones

de la ecuación diferencial que determina pueden ser imposibles de escribir explícitamente. Es por eso que con frecuencia buscamos cambios de coordenadas (continuos, diferenciables ó analíticos) que simplifiquen el campo vectorial.

Definición 2.1.1. Decimos que dos ecuaciones diferenciales determinadas, respectivamente, por dos campos, vectoriales F y F' definidos en los conjuntos abiertos U y U' de \mathbb{C}^2 son *analíticamente equivalentes* si existe un biholomorfismo $H: U \rightarrow U'$ que cumple la siguiente relación:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)F(x) = F'(H(x)).$$

Lo anterior quiere decir que la derivada del biholomorfismo H lleva el vector $F(x)$, anclado en el punto x , en el vector $F'(H(x))$ anclado en el punto $H(x)$.

Es muy común que en los textos sobre foliaciones ó ecuaciones diferenciales en variedades analíticas de dimensión dos, se usen las palabras foliación, campo vectorial y 1-forma para referirse al mismo objeto. Esta costumbre está justificada por los teoremas 2.1.4 y 2.1.5 que básicamente nos dicen que cuando en una ecuación diferencial nos olvidamos del tiempo y la parametrización de las soluciones, nos quedamos con una foliación y, los planos tangentes a hojas de una foliación resultan ser los ceros de una 1-forma. No es el propósito de esta tesis probar estos resultados, pero es bueno entender bien lo que éstos dicen para comprender cómo es que se relacionan estos objetos geométricos en primera instancia distintos.

Definición 2.1.2. A un punto $x \in U$ tal que $F(x) = (0, 0)$ se le conoce como *punto singular*. A lo largo de este trabajo denotaremos por Σ al conjunto de puntos singulares de F .

Otro hecho importante de la teoría de ecuaciones diferenciales es que fuera de los lugares con puntos singulares, todas las ecuaciones diferenciales tienen el mismo comportamiento local.

Teorema 2.1.2. *Toda ecuación diferencial definida por un campo vectorial holomorfo F es, en una vecindad de un punto no singular, analíticamente equivalente a la ecuación diferencial determinada por el campo vectorial constante $\tilde{F}(x) = (1, 0)$.*

Demostración. El flujo asociado al campo vectorial \tilde{F} es $\tilde{\varphi}((x, y, t)) = (x+t, y)$. Observemos que para toda (x, y) , $\tilde{\varphi}((x, y, -x)) \in \Pi' := \{x = 0\}$. Sea Π una transversal al vector $F((x_0, y_0))$ en el punto (x_0, y_0) . Si $h: \Pi' \rightarrow \Pi$ es un isomorfismo lineal y $\varphi((x, y, t))$ es el flujo del campo vectorial F , entonces la función $H = \varphi(h[\tilde{\varphi}((x, y, -x))], x)$ lleva las soluciones del campo vectorial \tilde{F} en las soluciones del campo vectorial F . Además, H manda a la transversal Π' en la transversal Π y el vector $(1, 0)$ en el vector $F((x_0, y_0)) \neq 0$, esto nos permite concluir que H es invertible. \square

Al teorema anterior se le conoce como el teorema de rectificación. Las soluciones de la ecuación diferencial definida por el campo $F' = (1, 0)$ son $x = x_0 + t, y = y_0$, y como afirma el teorema, si no hay puntos singulares, localmente podemos escribir a las soluciones de esta manera; esto motiva la siguiente definición:

Definición 2.1.3. La *foliación estándar* del disco $B := \{(x, y) \in \mathbb{C}^2 \mid |x| < 1, |y| < 1\}$ es la partición de B por conjuntos $L_y = \{|x| < 1\} \times \{y\}$ que llamaremos *hojas de la foliación*, i.e.:

$$B = \bigsqcup_{|y| < 1} L_y.$$

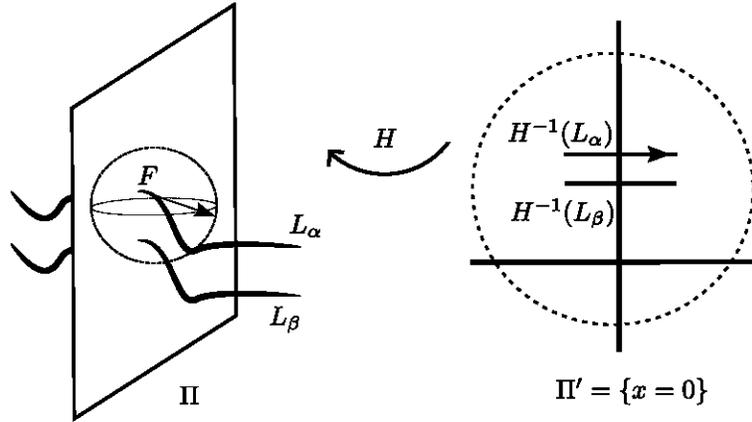


Figura 2.1: Teorema de recificación y la foliación estándar.

En la mayor parte de este trabajo trabajaremos en $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$, es por eso que necesitamos la siguiente definición:

Definición 2.1.4. Una *foliación no singular* \mathcal{F} en una dos variedad analítica M , es una partición de M en hojas L_α de tal forma que todo punto $x \in M$ tiene una vecindad B' y un biholomorfismo $H: B' \rightarrow B$ que manda las hojas locales $L_\alpha \cap B'$ de \mathcal{F} en las hojas de la foliación estándar. A la pareja (H, B') la llamaremos una *carta distinguida* de la foliación \mathcal{F} .

Es decir, una foliación no singular en una dos variedad analítica M , es una partición de M que localmente se ve como la foliación estándar. El teorema 2.1.2 nos asegura que las soluciones de una ecuación diferencial definida por un campo vectorial holomorfo sin puntos singulares, generan una foliación no singular.

Como en los puntos que no son singulares una ecuación diferencial tiene un comportamiento local sencillo, el verdadero interés es estudiar el comportamiento de una ecuación diferencial en una vecindad de un punto singular y, eventualmente, hacer un análisis global del comportamiento de la ecuación cuando esto sea posible.

Definición 2.1.5. Una *foliación singular holomorfa* en una dos variedad analítica M es una foliación no singular en $M \setminus \Sigma$ donde Σ es un conjunto de puntos aislados al cual llamaremos el *conjunto singular de la foliación*.

Todo campo vectorial F en M , con conjunto singular Σ , define, mediante las soluciones de la ecuación diferencial que determina, una foliación no singular \mathcal{F} en $M \setminus \Sigma$. Pero en principio, Σ podría ser un conjunto muy grande (por ejemplo, Σ podría ser toda una curva analítica) como para definir una foliación singular en M . El siguiente resultado afirma que para foliaciones en dos variedades analíticas, siempre es posible encontrar un conjunto de puntos aislados $\Sigma' \subset \Sigma$ y una foliación no singular $\tilde{\mathcal{F}}$ de $M \setminus \Sigma'$ de tal forma que las hojas de $\tilde{\mathcal{F}}$ coincidan con las hojas de \mathcal{F} en $M \setminus \Sigma$, esto quiere decir que siempre podemos extender a la foliación \mathcal{F} a una foliación no singular en M .

Teorema 2.1.3. [1] Sea F un campo vectorial definido en una dos variedad analítica M . Si Σ es el conjunto singular de F , entonces existe un conjunto de puntos aislados $\Sigma' \subset \Sigma$ y

una foliación no singular holomorfa $\tilde{\mathcal{F}}$ de $M \setminus \Sigma'$ cuya restricción a $M \setminus \Sigma$ coincide con la foliación generada por el campo vectorial F .

El teorema anterior básicamente dice que en las foliaciones singulares generadas por campos vectoriales holomorfos siempre podemos suponer que el conjunto singular Σ , es un conjunto de puntos aislados. El resultado recíproco también es cierto.

Teorema 2.1.4. [1] Sea $\Sigma \subset M$ un conjunto de puntos aislados de la dos variedad analítica M , \mathcal{F} una foliación no singular holomorfa en $M \setminus \Sigma$ que no se puede extender a ningún subconjunto de Σ .

Entonces, en una vecindad U de cada punto $a \in \Sigma$, la foliación \mathcal{F} está generada por un campo vectorial holomorfo F con conjunto singular $\Sigma \cap U$.

Así como definimos equivalencia analítica entre campos vectoriales, ahora damos la definición correspondiente para foliaciones.

Definición 2.1.6. Decimos que dos foliaciones singulares \mathcal{F} y \mathcal{F}' definidas en las variedades M y M' son *analíticamente equivalentes* si existe un biholomorfismo $H: M \rightarrow M'$ que manda las hojas de \mathcal{F} en las hojas de \mathcal{F}' y el conjunto singular Σ de \mathcal{F} en el conjunto singular Σ' de \mathcal{F}' .

El siguiente teorema relaciona campos vectoriales equivalentes con foliaciones equivalentes y foliaciones equivalentes con campos vectoriales “casi” equivalentes.

Teorema 2.1.5. [1] Sean $\dot{x} = F(x)$ y $\dot{x} = F'(x)$ dos ecuaciones diferenciales definidas por los campos vectoriales F y F' respectivamente. Si las ecuaciones diferenciales son analíticamente equivalentes, entonces las foliaciones que generan son analíticamente equivalentes.

Recíprocamente, si las foliaciones \mathcal{F} y \mathcal{F}' que generan los campos vectoriales F y F' respectivamente, son analíticamente equivalentes, entonces existe una función holomorfa ρ que no se anula fuera del conjunto singular de \mathcal{F} y cumple:

$$\rho(x) \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) F(x) = F'(H(x)).$$

El teorema anterior nos dice que, cuando hablamos de foliaciones, ya no importa tanto el vector tangente (y por lo tanto la parametrización de la solución) si no todo el subespacio uno dimensional que es tangente a la hoja de la foliación (la multiplicación por la función ρ es lo que nos permite concluir esto). Una manera de codificar estos subespacios tangentes es usando 1-formas.

A todo campo vectorial $F = (F_1, F_2)$ le podemos asociar la 1-forma $F_1 dy - F_2 dx$. Observemos que nuestro campo vectorial anula a esta 1-forma, pero como la 1-forma es lineal, también anula a todo el subespacio generado por el vector (F_1, F_2) . Así, el kernel de la 1-forma en el punto (x_0, y_0) está formado por el espacio tangente a la solución de la ecuación determinada por el campo vectorial F que pasa por el punto (x_0, y_0) .

Una de las ventajas de usar 1-formas es que si tenemos una función holomorfa H entre dos variedades analíticas M y N , podemos “jalar” cualquier 1-forma ω en N a una 1-forma $H^*(\omega)$ en M . Esto lo podemos lograr usando la derivada de H para empujar vectores tangentes a M en vectores tangentes a N y después evaluarlos en ω , *i.e.*:

$$H^*(\omega)(v) := \omega \left(\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) v \right), \quad v \in TM.$$

2.2. Holonomía local.

Una herramienta muy útil al estudiar una ecuación diferencial es el análisis del comportamiento de la dinámica transversal de sus soluciones. Esta dinámica la obtenemos estudiando el grupo de holonomía asociado a una hoja determinada de la foliación. A continuación veremos cómo asociar este grupo a una ecuación diferencial.

Una transversal a una hoja L de una foliación \mathcal{F} de M en el punto a , es la imagen de una función holomorfa $\tau: (\mathbb{C}, 0) \rightarrow (M, a)$ que corta de manera transversal a L .

Si en un punto $a \in L$ tomamos una carta distinguida $(H = (h_1, h_2), B')$ del punto a tal que $H(L) = L_0 = \{(x, 0)\} \subset B$ entonces, para todo punto $b \in L \cap B'$, si consideramos las transversales locales a L en los puntos a y b definidas por $\tau := H^{-1}(\{(h_1(a), y); |y| < 1\})$ y $\tau' := H^{-1}(\{(h_1(b), y); |y| < 1\})$, podemos definir una transformación entre las transversales τ y τ' .

En efecto, si en la hoja L tomamos una curva $\gamma: [0, 1] \rightarrow L$ que una a los puntos a y b entonces, la curva imagen $\tilde{\gamma} := H(\gamma)$ que une a los puntos $(h_1(a), 0)$ y $(h_1(b), 0)$ puede ser levantada a curvas $\tilde{\gamma}_\alpha$ en las hojas L_α de la foliación estándar para así, mediante el biholomorfismo H^{-1} , obtener curvas γ_α que unan a las transversales τ y τ' .

Así, para un punto $x \in \tau$, existe una curva $\gamma_\alpha: [0, 1] \rightarrow L_\alpha$ tal que $\gamma_\alpha(0) \in \tau$ y $\gamma_\alpha(1) \in \tau'$ y por lo tanto, podemos definir la *transformación de correspondencia* entre τ y τ' asociada a γ como $\Delta_{\tau, \tau'}^\gamma(x) = \gamma_\alpha(1)$. Como las soluciones de una ecuación diferencial dependen de manera holomorfa de la condición inicial, la transformación de correspondencia es una función holomorfa.

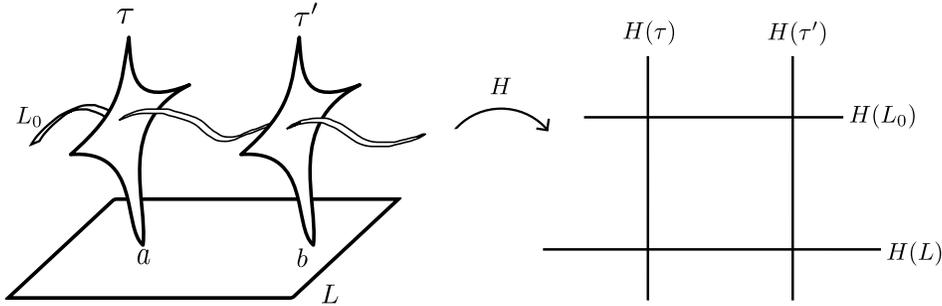


Figura 2.2: Transformación de correspondencia.

Si tomamos un tercer punto $c \in \gamma([0, 1])$ y una tercera transversal τ'' a L por el punto c , entonces se satisface la identidad:

$$\Delta_{\tau, \tau''}^\gamma = \Delta_{\tau', \tau''}^\gamma \circ \Delta_{\tau, \tau'}^\gamma,$$

además, la transformación de correspondencia sólo depende de la clase de homotopía de γ . En efecto, si δ es una curva que es homotópica a γ entonces $\delta^{-1} \circ \gamma$ es un camino cerrado y para todo $x \in \tau$, si $L_\alpha \cap \tau = x$, se tiene que los levantamientos de δ y γ satisfacen

$\delta(0) = x = \gamma(0)$. Esto significa que la transformación de correspondencia asociada al camino $\delta^{-1} \circ \gamma$ y la transversal τ es la identidad y por lo tanto las transformaciones $\Delta_{\tau, \tau'}^{\delta}$ y $\Delta_{\tau, \tau'}^{\gamma}$ coinciden. Estas dos observaciones nos van a permitir definir una transformación de correspondencia entre dos transversales a una hoja L que sean unidas por un camino γ .

Si tenemos una curva $\gamma: [0, 1] \rightarrow L$ y dos transversales τ, τ' a L en los puntos $\gamma(0)$ y $\gamma(1)$ respectivamente, podemos cubrir a $\gamma([0, 1])$ con un número finito de abiertos distinguidos U_j de tal forma que en cada U_j la foliación sea equivalente a la foliación estándar. En cada uno de estos abiertos U_j podemos poner transversales auxiliares τ_j y obtener un mapeo de correspondencia entre transversales consecutivas. Si componemos todos estos mapeos, al final obtenemos una transformación Δ_{γ} entre las transversales τ y τ' .

Si γ^{-1} es la curva γ recorrida en sentido opuesto tenemos que $\Delta_{\gamma^{-1}} \circ \Delta_{\gamma} = Id$ y entonces, la transformación Δ_{γ} es un biholomorfismo.

Como una transversal no es más que una imagen biholomorfa de una vecindad $U \subset \mathbb{C}$ podemos tomar cartas de cada una de ellas y así, si los puntos $a, a' \in L$ por los cuales pasan las transversales τ y τ' son distintos, reparametrizando las transversales, siempre es posible encontrar coordenadas de tal forma que el mapeo de correspondencia asociado a un camino que una ambos puntos, se vea como la identidad, es por eso que vamos a considerar caminos cerrados y usaremos una sola transversal τ .

Definición 2.2.1. Sea $a \in L$, τ una transversal a L por el punto a y $\gamma \in \pi_1(L, a)$ un camino cerrado. La *transformación de holonomía* $\Delta_{\gamma}: (\tau, a) \rightarrow (\tau, a)$ es la transformación de correspondencia a lo largo del camino cerrado γ . Tomando una carta de τ alrededor del punto a , podemos pensar a la transformación de holonomía como un biholomorfismo de una vecindad $U \subset \mathbb{C}$ del origen en ella misma, es decir, $\Delta_{\gamma} \in \text{Diff}(\mathbb{C}, 0)$.

Con las construcciones anteriores, por cada elemento γ del grupo fundamental de la hoja L obtenemos un biholomorfismo $\Delta_{\gamma} \in \text{Diff}(\mathbb{C}, 0)$. Al grupo formado por todos estos biholomorfismos lo llamaremos grupo de holonomía de la foliación \mathcal{F} a lo largo de la hoja L .

Ejemplo 2.2.1. La ecuación diferencial lineal

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \lambda_1 x \\ \dot{y} &= \lambda_2 y\end{aligned}$$

tiene por solución a

$$\begin{aligned}x(t) &= c_1 e^{\lambda_1 t} \\ y(t) &= c_2 e^{\lambda_2 t}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{C}.\end{aligned}$$

Vamos a calcular el grupo de holonomía asociado a la hoja $L = \{y = 0\} \setminus \{0\}$ y la transversal $\{x = 1\}$.

Un generador del grupo fundamental de L es el lazo $\gamma = \{|x| = 1\}$. Si consideramos el segmento de recta $\{t \frac{2\pi i}{\lambda_1} \mid t \in [0, 1]\} \subset \mathbb{C}$, su imagen bajo la solución con condición inicial $(1, 0)$ coincide con el lazo γ , y su imagen bajo cualquier otra solución que tenga condición inicial en la recta $\{x = 1\}$ termina de nuevo en esta transversal pues, $x(\frac{2\pi i}{\lambda_1}) = c_1 e^{2\pi i} = c_1$; si la condición inicial está en la transversal, entonces $c_1 = 1$ y así, $x(\frac{2\pi i}{\lambda_1}) = 1$. Por lo tanto, el mapeo de holonomía es:

$$y \mapsto e^{2\pi i \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} y. \quad (2.2)$$

La transformación de holonomía se puede definir en cualquier transversal a una hoja de la foliación. Podemos cambiar de transversal usando, otra vez, a las hojas de la foliación y así obtenemos un biholomorfismo entre las transversales. Por lo tanto, los grupos de holonomía asociados a ambas transversales son conjugados el uno del otro.

2.3. Holonomía global.

La transformación de holonomía que se definió en la sección anterior es un concepto local, la transformación de holonomía fija un punto (la intersección de la transversal τ con la hoja L a la cual se le está calculando el grupo de holonomía) y la transformación sólo está definida en una vecindad de ese punto.

Sería agradable poder, en algunos casos, definir esta transformación de manera global, es decir, en toda la transversal τ . Para definir la transformación de holonomía (local), usábamos las hojas de la foliación para movernos de una transversal τ a otra transversal τ' , pero para poder hacer esto, necesitábamos que la transversal τ a la hoja L siguiera cortando de manera transversal a hojas suficientemente cercanas a L . Por lo tanto, si queremos definir una transformación de holonomía global vamos a necesitar una curva analítica que sea transversal a todas las hojas de la foliación.

Además, vamos a necesitar que, cuando nos movamos de un punto x a un punto y en una misma hoja L , la transversal a L en el punto x sea analíticamente equivalente a la transversal a L en el punto y . Es por eso que hacemos la siguiente definición.

Definición 2.3.1. Sea E una dos variedad analítica y $\Pi: E \rightarrow B$ un haz fibrado con fibra F . Diremos que una foliación no singular \mathcal{F} de E es *transversal a las fibras de (E, Π)* si:

1. Para todo $p \in E$, la hoja L_p de \mathcal{F} corta de manera transversal a $F_{\Pi(p)}$.
2. Si L es una hoja de \mathcal{F} entonces $\Pi: L \rightarrow B$ es una aplicación cubriente.

Si tenemos que la foliación \mathcal{F} es transversal a las fibras de (E, Π) , por cada elemento $[\gamma]$ del grupo fundamental $\pi_1(B, b)$ del espacio base B , podemos asociar un biholomorfismo de la fibra $\varphi_{[\gamma]}: F \rightarrow F$ de la siguiente manera.

Sea $\gamma: [0, 1] \rightarrow B$ un lazo tal que $\gamma(0) = \gamma(1) = b$ y sea $y \in \Pi^{-1}(b) = F$. Si L_y es la hoja de \mathcal{F} que pasa por el punto y , entonces, como $\Pi: L \rightarrow B$ es una aplicación cubriente, podemos levantar a γ a una única curva $\tilde{\gamma}: [0, 1] \rightarrow L_y$ tal que, $\tilde{\gamma}(0) = y$ y $\Pi \circ \tilde{\gamma} = \gamma$. Esto quiere decir que $\Pi(\tilde{\gamma}(1)) = \gamma(1) = b$ y por lo tanto $\tilde{\gamma}(1) \in \Pi^{-1}(b) = F$.

Así, para un punto $y \in \Pi^{-1}(b)$ podemos definir $\varphi_\gamma(y) = \tilde{\gamma}(1)$. Como el punto final de $\tilde{\gamma}$ sólo depende de la clase de homotopía de γ , la asociación anterior asigna a cada elemento $[\gamma] \in \pi_1(B, b)$ una transformación $\varphi_{[\gamma]}: F \rightarrow F$.

Gracias a que las soluciones de una ecuación diferencial dependen de manera analítica de las condiciones iniciales (Teorema 2.1.1), $\varphi_{[\gamma]}$ es una transformación analítica y es un

biholomorfismo ya que $\varphi_{[\gamma^{-1}]}$ es una inversa analítica de φ_γ .

Definición 2.3.2. Sea \mathcal{F} una foliación transversal a las fibras de (E, Π, B) . Si $[\gamma] \in \pi_1(B, b)$ y $F = \Pi^{-1}(b)$, llamaremos *transformación de holonomía global* asociada a $[\gamma]$, a la transformación $\varphi_{[\gamma]}: F \rightarrow F$ construida arriba. Al grupo formado por todas estas transformaciones se le conoce como *el grupo de holonomía global*.

Ejemplo 2.3.1. (Foliaciones de Riccati). La ecuación diferencial

$$\frac{dw}{dz} = \frac{a(z)w^2 + b(z)w + c(z)}{R(z)},$$

donde $a, b, c, R \in \mathbb{C}[z]$ son polinomios en una variable, definen un campo de direcciones en $\mathbb{C} \times \mathbb{C}$ y si consideramos la foliación \mathcal{F} generada por este campo, usando los cambios de coordenadas $\tilde{z} = \frac{1}{z}$ y $\tilde{w} = \frac{1}{w}$ podemos extender esta foliación a $\mathbb{CP} \times \mathbb{CP}$. Sea $Z(R)$ el conjunto de ceros del polinomio R , si $p \in \mathbb{C} \setminus Z(R)$ el conjunto $\{p\} \times \mathbb{CP}$ corta de manera transversal a las hojas de la foliación \mathcal{F} , y si $p \in Z(R)$, la hoja que pasa por p es $\{p\} \times \mathbb{CP}$. Por lo tanto, si consideramos el haz $\Pi: \mathbb{CP} \times \mathbb{CP} \rightarrow \mathbb{CP}$, este haz satisface la primera condición de la definición 2.3.1. Cuando la fibra del haz es compacta, en [3] se muestra que la primera condición implica la segunda. El grupo de holonomía global asociado a esta foliación es un subgrupo de $PSL(2, \mathbb{C})$.

Si tenemos una separatriz L de la foliación \mathcal{F} , y $p \in \bar{L}$ es un punto singular de \mathcal{F} , podemos obtener la transformación de holonomía local asociada a L , al restringir, a una vecindad $V \subset F$ suficientemente pequeña de $L \cap F$, la transformación de holonomía global asociada a un lazo γ que rodee a $\Pi(p)$. Esto se debe a que el lazo γ se levanta a L como un lazo $\tilde{\gamma}$ que rodea al punto singular p en la separatriz L (localmente, la separatriz es un disco sin un punto). Y la transformación de holonomía local, también puede construirse levantando un lazo de L a curvas en hojas de \mathcal{F} suficientemente cercanas a L . Es precisamente la imposibilidad de levantar lazos de L a cualquier hoja de \mathcal{F} lo que hace a la holonomía de la sección anterior, una transformación local.

Lo anterior nos permite heredar algunas propiedades de la transformación de holonomía local a la transformación de holonomía global. Por ejemplo, si la transformación de holonomía local f tiene orden finito (*i.e.*, $f^n = Id$ para algún $n \in \mathbb{N}$), entonces la transformación de holonomía global que coincide en un abierto con f , también tiene orden finito y los órdenes de ambas coinciden.

Más adelante necesitaremos el siguiente resultado,

Lema 2.3.1. *Sea V una dos variedad analítica y $H: V \rightarrow \Omega \subset \mathbb{C}$ una función analítica sin puntos críticos tal que existe una foliación no singular \mathcal{F} que corta de manera transversal a todas las curvas de nivel de H y, para cualesquiera $a, b \in \Omega$, $H^{-1}(a)$ es compacta y topológicamente equivalente a $H^{-1}(b)$. Entonces, (V, H, Ω) es un haz topológico.*

Demostración. Para exhibir a las trivializaciones locales alrededor de un punto $a \in \Omega$ vamos a usar el flujo g del campo vectorial que genera a la foliación \mathcal{F} en una vecindad de cada punto $z \in H^{-1}(a)$. Alrededor de este punto z , existe una vecindad $\tilde{W}_z \subset V$, un disco D_ϵ y una función $g: \tilde{W}_z \times D_\epsilon$ tal que para $z_0 \in W_z := W_z \cap \tilde{H}^{-1}(a)$, $g(z_0, t)$ es la hoja de la

foliación \mathcal{F} que pasa por z_0 .

Sea $U_z = H(\tilde{W}_z)$ y consideremos la función $H \circ g: W_z \times D_\epsilon \subset H^{-1}(a) \times D_\epsilon \rightarrow U_z$. Como para toda $p \in \Omega$, $H^{-1}(p)$ corta de manera transversal a todas las hojas de la foliación \mathcal{F} tenemos que,

$$\frac{\partial(H \circ g)}{\partial t} = \nabla H \frac{\partial g}{\partial t} \neq 0.$$

Así, dado $b \in U_z$ existe una función analítica $\varphi_z(b, \cdot): W_z \subset H^{-1}(a) \rightarrow H^{-1}(b)$ (haciendo un abuso de notación) tal que alrededor de $z \in W_z$, $H \circ g(x, \varphi_z(b, x)) = b$.

Si para cada $z \in H^{-1}(a)$ hacemos la construcción anterior, como $H^{-1}(a)$ es compacto, podemos encontrar una cubierta finita W_1, \dots, W_n de $H^{-1}(a)$ tal que si $b \in U := \bigcap_{i=1}^n H(W_i)$, entonces existe una función analítica e inyectiva $\varphi(b, \cdot): H^{-1}(a) \rightarrow H^{-1}(b)$. En efecto, para $x \in H^{-1}(a)$ se tiene que $x \in W_k$ para alguna k y así podemos definir $\varphi(b, x) = \varphi_k(b, x)$. La función anterior está bien definida pues si $x \in W_i \cap W_k$, $i \neq k$ el teorema de existencia unicidad nos asegura que las funciones $\varphi_i(b, \cdot)$ y $\varphi_k(b, \cdot)$ coinciden en el conjunto $W_i \cap W_k$ y por lo mismo, tenemos que $\varphi(b, \cdot)$ es inyectiva. Como $H^{-1}(a)$ es compacta, la función analítica $\varphi(b, \cdot)$ también es suprayectiva y es por lo tanto, un biholomorfismo.

Como todas las curvas de nivel son homeomorfas a una superficie F , para cada $a \in \Omega$ hemos encontrado una vecindad $U \subset \Omega$ y un biholomorfismo $\varphi: U \times F \rightarrow H^{-1}(U)$ que manda a los puntos $(b, x) \in U \times F$ en el conjunto $H^{-1}(b)$. Esto quiere decir que φ^{-1} es una trivialización local de (V, H, Ω) . □

Por último, observemos que si fijamos $x_0 \in H^{-1}(a)$ y L_{x_0} es la hoja de \mathcal{F} que pasa por x_0 , entonces $\varphi(t, x_0) \subset L_{x_0} \cap H^{-1}(U)$. Esto quiere decir que,

$$\varphi^{-1}(L_{x_0} \cap H^{-1}(U)) = \bigsqcup_{x \in L_{x_0} \cap H^{-1}(U)} U \times \{x\}.$$

Como de manera local tenemos que $H = \Pi_1 \circ \varphi^{-1}$ entonces, si L es una hoja de la foliación \mathcal{F} , $H: L \rightarrow \Omega$ es una aplicación cubriente.

Observación 2.3.1. En el caso del grupo holonomía local, la órbita de un punto x de una hoja L siempre está contenida en la intersección de la hoja L con la transversal local τ y hay ejemplos en donde la contención es estricta. Pero en el caso del grupo de holonomía global, como la proyección en el espacio base $\Pi: L \rightarrow B$ es una aplicación cubriente, al fijar una transversal F_a la órbita de un punto $x \in L \cap F_a$ bajo el grupo de holonomía global es la órbita de x bajo el grupo de monodromía de la aplicación cubriente Π (este grupo se obtiene al levantar lazos basados en un punto $x \in B$ a la hoja L) y es por lo tanto transitiva. Es decir, en el caso del grupo de holonomía global, la órbita de un punto x en una hoja L sí coincide con la intersección $L \cap F_a$.

2.4. El plano proyectivo complejo $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$.

El espacio proyectivo complejo $\mathbb{C}\mathbb{P}^n$ es el conjunto de todos los subespacios uno dimensionales de \mathbb{C}^{n+1} . Si en $\mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\}$ consideramos la relación de equivalencia $x \sim y$ sí y sólo

sí $x = \lambda y$, $\lambda \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$, entonces $\mathbb{C}\mathbb{P}^n = \mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$.

En el caso $n = 2$ obtenemos el plano proyectivo complejo, y en el caso $n = 1$ obtenemos la recta proyectiva compleja que es nada más y nada menos que una esfera.

Denotaremos por $[x_0 : y_0 : z_0]$ a la clase de (x_0, y_0, z_0) i.e. $[x_0 : y_0 : z_0] := \{(x, y, z) \in \mathbb{C}^3 \setminus \{0\} \mid \exists \lambda \in \mathbb{C}, (x_0, y_0, z_0) = \lambda(x, y, z)\}$. A esta manera de denotar los puntos de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ se le conoce como coordenadas homogéneas.

Con la topología cociente, $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ tiene una estructura natural de dos variedad analítica dada por las siguientes cartas: los abiertos que usaremos son $U_x = \{[x : y : z] \mid x \neq 0\}$, $U_y = \{[x : y : z] \mid y \neq 0\}$, $U_z = \{[x : y : z] \mid z \neq 0\}$ y los homomorfismos son:

$$\begin{aligned} \psi_x: \quad U_x &\rightarrow \mathbb{C}^2 \\ [x : y : z] &\mapsto \left(\frac{y}{x}, \frac{z}{x}\right) \\ \\ \psi_y: \quad U_y &\rightarrow \mathbb{C}^2 \\ [x : y : z] &\mapsto \left(\frac{x}{y}, \frac{z}{y}\right) \\ \\ \psi_z: \quad U_z &\rightarrow \mathbb{C}^2 \\ [x : y : z] &\mapsto \left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z}\right) \end{aligned}$$

Podemos pensar al mapeo ψ_z como si a cada punto $[x : y : z]$ de $U_z \subset \mathbb{C}\mathbb{P}^2$ lo mandáramos al representante $(\frac{x}{z}, \frac{y}{z}, 1)$; a esta carta sólo le falta cubrir a las clases $[x : y : 0]$. Si nos quedamos solamente con las primeras dos coordenadas $[x : y]$, estos puntos forman un $\mathbb{C}\mathbb{P}^1$, que como ya hemos mencionado es una esfera.

Así, podemos pensar a $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ como un plano complejo \mathbb{C}^2 al cual, le hemos pegado una recta proyectiva, la recta al infinito.

La mayoría del tiempo trabajaremos en las coordenadas $\psi_z(U_z) = \mathbb{C}^2$, pero a veces necesitaremos ir a las otras dos cartas para ver el comportamiento de algunas cosas que pasan en la recta al infinito.

Los cambios de coordenadas de $\psi_x(U_x)$ a $\psi_z(U_z)$ y de $\psi_y(U_y)$ a $\psi_z(U_z)$ están dados por:

$$\begin{aligned} \psi_z \circ \psi_x^{-1}(u, v) &= \left(\frac{1}{u}, \frac{v}{u}\right) \\ \psi_z \circ \psi_y^{-1}(u, v) &= \left(\frac{u}{v}, \frac{1}{v}\right). \end{aligned} \tag{2.3}$$

2.5. El teorema de linealización de Poincaré.

Como mencionamos anteriormente, un problema fundamental de la teoría de ecuaciones diferenciales es simplificar, mediante un cambio de coordenadas, un campo vectorial F . Si este campo vectorial tiene parte lineal, una pregunta natural es cuándo este campo vectorial es analíticamente equivalente a su parte lineal. El teorema de linealización de Poincaré nos

dice bajo qué condiciones un campo vectorial es analíticamente equivalente a su parte lineal.

Sea $F(x) = Ax + V_2(x) + \dots + V_m(x) + \dots$ donde $A = (\frac{\partial F}{\partial x})(0)$ es la parte lineal del campo vectorial en el origen y los V_m son campos vectoriales homogéneos de grado m . Una manera de atacar el problema de linealización es intentar eliminar el término V_2 mediante un biholomorfismo H_2 . Una vez logrado ésto procedemos a eliminar el término V_3 con un biholomorfismo H_3 y así sucesivamente.

Supongamos que tenemos un campo vectorial $F = (F_1, F_2)$ del siguiente estilo:

$$\begin{aligned} F_1 &= \lambda_1 x + ax^\alpha y^\beta + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}) \\ F_2 &= \lambda_2 y + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}). \end{aligned}$$

El objetivo es encontrar un biholomorfismo $H: (\mathbb{C}^2, 0) \rightarrow (\mathbb{C}^2, 0)$ que conjugue este campo vectorial con un campo vectorial $\tilde{F} = (\tilde{F}_1, \tilde{F}_2)$ de la forma:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_1 &= \lambda_1 x + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}) \\ \tilde{F}_2 &= \lambda_2 y + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}). \end{aligned}$$

Para lograr esto, el biholomorfismo H y los campos vectoriales tienen que satisfacer la igualdad:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)F(x) = \tilde{F}(H(x)). \quad (2.4)$$

Si hacemos $H(x, y) = (x, y) + c(x^\alpha y^\beta, 0)$ el lado izquierdo de la ecuación (2.4) es:

$$\left(\text{Id} + c \begin{pmatrix} \alpha x^{\alpha-1} y^\beta & \beta x^\alpha y^{\beta-1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\right) \begin{pmatrix} \lambda_1 x + ax^\alpha y^\beta + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}) \\ \lambda_2 y \end{pmatrix}.$$

La primera entrada de este vector es,

$$\lambda_1 x + ax^\alpha y^\beta + cx^\alpha y^\beta (\alpha \lambda_1 + \beta \lambda_2) + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}). \quad (2.5)$$

La primera coordenada del lado derecho de la ecuación (2.4), $\tilde{F}(H(x, y)) = \tilde{F}((x, y) + c(x^\alpha y^\beta, 0))$ es,

$$\lambda_1 (x + cx^\alpha y^\beta) + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}). \quad (2.6)$$

Si queremos que el biholomorfismo H conjugue a los campos vectoriales F y \tilde{F} , los monomios de grado uno y de grado $\alpha + \beta$ de ambos campos vectoriales deben ser iguales. Así igualando las expresiones (2.5) y (2.6) tenemos que,

$$a + c(\alpha \lambda_1 + \beta \lambda_2) = \lambda_1 c.$$

En caso de que $\lambda_1 - \alpha \lambda_1 + \beta \lambda_2 \neq 0$ podemos despejar a c y obtener:

$$c = \frac{a}{\lambda_1 - (\alpha \lambda_1 + \beta \lambda_2)}.$$

Con nuestra elección de H , es claro que la segunda coordenada de ambos vectores de la ecuación (2.4) es la misma. Por lo tanto, si $\lambda_1 - \alpha \lambda_1 + \beta \lambda_2 \neq 0$, existe un biholomorfismo H que conjuga a los campos vectoriales F y \tilde{F} .

Definición 2.5.1. Diremos que la pareja $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{C}^2$ es *resonante* si existen números naturales $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_1 + \alpha_2 > 1$ tales que:

$$\lambda_j = \alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2. \quad (2.7)$$

En el cálculo anterior si reemplazamos el campo vectorial F por un campo vectorial de la forma,

$$\begin{aligned} F_1 &= \lambda_1 x + V_{\alpha+\beta}(x, y) + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}) \\ F_2 &= \lambda_2 y + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}), \end{aligned}$$

donde $V_{\alpha+\beta}(x, y)$ es un polinomio homogéneo de grado $\alpha + \beta$ en el cual aparece el monomio $ax^\alpha y^\beta$, no es difícil convencerse de que $H(x, y) = (x, y) + (cx^\alpha y^\beta, 0)$ conjuga a este campo vectorial con:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_1 &= \lambda_1 x + V_{\alpha+\beta} - ax^\alpha y^\beta + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}) \\ \tilde{F}_2 &= \lambda_2 y + O(\|(x, y)\|^{\alpha+\beta}). \end{aligned}$$

Una vez eliminado el monomio $ax^\alpha y^\beta$, si la pareja (λ_1, λ_2) es no resonante, podemos eliminar los demás monomios de grado $\alpha + \beta$ en la primera coordenada. Si en la segunda coordenada también hay monomios de grado $\alpha + \beta$, con un procedimiento similar podemos eliminarlos.

Si los valores propios de A son no resonantes entonces podemos eliminar cualquier término no lineal de F mediante un biholomorfismo pero, si queremos eliminar todos los términos no lineales de un jalón, tendremos que componer una infinidad de biholomorfismos y el resultado no siempre será un biholomorfismo sino simplemente una serie de potencias formal. Esto se debe a que los números $\lambda_j - \alpha_1 \lambda_1 - \alpha_2 \lambda_2$ pueden ser muy pequeños y en consecuencia, al dividir por ellos, podemos afectar la convergencia de la serie de potencias que linealiza (de manera formal) al campo vectorial. Es por eso que si queremos que la serie de potencias converja, tenemos que pedir algo adicional a los valores propios de A .

Definición 2.5.2. Sean $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$, si la cerradura convexa del conjunto $\{\lambda_1, \lambda_2\} \subset \mathbb{C}$ no contiene al origen, diremos que $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$ está en el *dominio de Poincaré*. En caso contrario, diremos que λ está en el *dominio de Siegel*.

Si pensamos a los número complejos λ_1, λ_2 como vectores en \mathbb{R}^2 , estar en el dominio de Siegel se traduce a que λ_1 y λ_2 sean linealmente dependientes y de sentidos opuestos.

Con las dos definiciones anteriores podemos enunciar el teorema de linealización de Poincaré (ver [1]).

Teorema 2.5.1. *Si los valores propios de la parte lineal del campo vectorial F son no resonantes y están en el dominio de Poincaré, entonces F es analíticamente equivalente a su parte lineal.*

Ejemplo 2.5.1. Si los valores propios de la parte lineal de un campo vectorial F son iguales y distintos de cero, entonces el campo vectorial F es analíticamente equivalente a su parte lineal. Esto se debe a que si $\lambda_1 = \lambda_2$ entonces la ecuación (2.7) sólo tiene solución con $\alpha_1 = 1$ y $\alpha_2 = 0$ y en consecuencia la pareja (λ_1, λ_2) es no resonante. Además como los valores propios coinciden, su cerradura convexa es un único punto $\lambda_1 \neq 0$.

2.6. Explosión de singularidades.

En la sección anterior enunciamos bajo qué condiciones un campo vectorial, con parte lineal no nula, es analíticamente equivalente a su parte lineal pero, ¿y si nuestro campo vectorial no tiene parte lineal? Cuando esto sucede, una técnica muy utilizada es la explosión de singularidades. A continuación describimos este proceso.

Intuitivamente, si un campo vectorial no tiene parte lineal en el origen, el campo vectorial aplasta todos los subespacios 1-dimensionales que salen del origen. Es por eso que vamos a intentar “separar” a estos subespacios 1-dimensionales.

Consideremos la proyección canónica de $p: \mathbb{C}^2 \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{CP}^1$. Esta proyección asocia a cada punto $(x, y) \in \mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$ su clase de equivalencia $[x : y] \in \mathbb{CP}^1$, o lo que es lo mismo, p envía a todo un subespacio 1-dimensional menos el origen en un solo punto de \mathbb{CP}^1 .

La gráfica de esta función $graf(p)$ es un subconjunto del producto $\mathbb{C}^2 \times \mathbb{CP}^1$ y está determinada por los puntos de la forma $\{((x, y), [x : y]), (x, y) \neq (0, 0)\}$. En esta gráfica, todos los subespacios 1-dimensionales de \mathbb{C}^2 ya están “separados” pues a subespacios 1-dimensional distintos de \mathbb{C}^2 les corresponden puntos distintos en \mathbb{CP}^1 .

La proyección $\Pi: \mathbb{C}^2 \times \mathbb{CP}^1 \rightarrow \mathbb{C}^2$ es una función biyectiva entre $graf(p)$ y $\mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$ y además la imagen inversa del origen es *el divisor excepcional* $E := \Pi^{-1}(0) = \{0\} \times \mathbb{CP}^1 \simeq \mathbb{CP}^1$. Si con una transformación queremos alterar la parte lineal de un campo vectorial, no podemos utilizar transformaciones analíticas invertibles, ya que éstas preservan la parte lineal del campo vectorial.

Por todo lo anterior, si $M := graf(p) \cup E$, la pareja (M, Π) es un buen candidato para desingularizar un campo vectorial. Pero todo el proceso de desingularización lo debemos llevar a cabo de manera analítica, es por eso que debemos darle a M una estructura de variedad analítica y mostrar que con esa estructura, Π es una función analítica.

Si usamos la carta $u = \frac{w}{z}$ de \mathbb{CP}^1 , M queda descrita por los puntos que satisfacen $u = \frac{y}{x} \Rightarrow y = ux$ (esta última ecuación también incluye a los puntos de E).

En estas coordenadas la función $\varphi((x, y), [z : w]) = (x, \frac{w}{z}) = (x, u)$ restringida a M es una carta de M . Como en los puntos de M se cumple que $y = ux$, la función inversa de esta carta es $\varphi^{-1}(x, u) = ((x, ux), u) = ((x, ux), [z : w])$.

De manera análoga, en la otra carta de \mathbb{CP}^1 , $v = \frac{x}{y}$, M queda descrita por $x = vy$ y la función $\phi((x, y), [z : w]) = (y, \frac{w}{z}) = (y, v)$ es otra carta de M cuya inversa es $\phi^{-1}(y, v) = ((vy, y), v)$

Como las cartas $((x, y), u)$ y $((x, y), v)$ cubren a todo $\mathbb{C}^2 \times \mathbb{CP}^1$, las cartas (x, u) y (y, v) cubren a M y el cambio de coordenadas de (x, u) a (y, v) está dado por:

$$\phi \circ \varphi^{-1}(x, u) = (ux, \frac{1}{u}). \quad (2.8)$$

Las dos cartas anteriores hacen de M una dos variedad analítica y en la carta (x, u) la proyección $\Pi: M \rightarrow \mathbb{C}^2$ adquiere la forma $\Pi(x, u) = (x, ux)$ ya que en esta carta $y = ux$. Mientras que en la otra carta, $\Pi(y, v) = (vy, y)$.

Lo anterior prueba que, con la estructura analítica que le hemos dado a M , Π es una función analítica y entonces podemos usarla para jalar 1-formas en \mathbb{C}^2 (y en consecuencia foliaciones y campos vectoriales) a M .

Si tenemos una 1-forma ω en \mathbb{C}^2 con punto singular aislado en el origen, esta 1-forma define una foliación no singular \mathcal{F} en $\mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$. Así, $\Pi^*(\omega)$ define una foliación no singular $\Pi^*(\mathcal{F})$ en $M \setminus E$. Pero gracias al teorema 2.1.3 podemos extender a $\Pi^*(\mathcal{F})$ a todo M como una foliación singular con puntos singulares aislados en el divisor excepcional E . Al proceso anterior se le conoce como *explosión de la 1-forma ω* ó *explosión de la foliación \mathcal{F}* . A esta técnica de explosión de singularidades también se le conoce como *desingularización*.

Ejemplo 2.6.1. Haremos la explosión de la 1-forma $\omega = rx dy - y dx, r \in \mathbb{N}$. La foliación que esta 1-forma genera tiene un punto singular tipo nodo en el origen. Si usamos la carta (x, u) , entonces $\Pi(x, u) = (x, ux)$ y,

$$\Pi^*(\omega) = rx d(ux) - ux dx = x[r(x du + u dx) - u dx] = x[rx du - (1-r)u dx].$$

$\Pi^*(\omega)$ define una foliación no singular en $M \setminus E$ y como en esta carta $E = \{x = 0\}$, la función x no se anula en $M \setminus E$. Así, podemos multiplicar a la 1-forma $\Pi^*(\omega)$ por x para obtener una nueva 1-forma $\omega_1 = rx du - (1-r)u dx$ que define la misma foliación que $\Pi^*(\omega)$ en $M \setminus E$ pero tiene singularidades aisladas en el divisor excepcional E . La foliación que esta 1-forma genera tiene un punto singular tipo silla.

Si usamos la otra carta (v, y) de M en la cual $\Pi(v, y) = (vy, y)$ entonces,

$$\Pi^*(\omega) = (r-1)v dy - y dv.$$

Esto quiere decir que en esta carta la foliación que Π^* genera tiene un punto singular tipo nodo pero es más “plano” que el nodo original.

Nada nos impide volver a explotar este nodo y cuando lo hacemos, nuevamente obtenemos un punto silla en la primera carta y un nodo más “plano” en la segunda. Si siempre usamos la carta en donde aparece el nodo, después de r explosiones vamos a obtener una foliación que es transversal al divisor que aparece en la última explosión. En efecto, si componemos las r explosiones sucesivas obtenemos,

$$(v, y) \mapsto (vy, y) \mapsto (vy^2, y) \mapsto \cdots \mapsto (vy^r, y),$$

en esta carta el último divisor queda descrito por $\{y = 0\}$ y si $\Pi_r(v, y) = (vy^r, y)$ entonces,

$$\Pi_r^*(\omega) = rvy^r dy - yd(vy^r) = rvy^r dy - y(y^r dv + rvy^{r-1} dy) = y^{r+1} dv \sim dv.$$

Observemos que en el caso $r = 1$ (la foliación radial) sólo necesitamos explotar una vez para obtener una foliación transversal al divisor.

Una observación muy importante es que todo el proceso de desingularización puede llevarse acabo de manera local (sólo hay que restringir toda la construcción a una vecindad del origen $(\mathbb{C}^2, 0)$). Si tenemos una foliación \mathcal{F} con un número finito de singularidades Σ en una dos variedad analítica M , la observación anterior nos permite hacer una explosión local

en cada uno de los puntos singulares para así obtener una nueva variedad M' y una función holomorfa $\Pi: M' \rightarrow M$ que satisface las siguientes propiedades:

1. Si $p \in \Sigma$ entonces $\Pi^{-1}(p) := E_p \simeq \mathbb{CP}^1$.
2. Π es un biholomorfismo entre $M' \setminus \bigcup_{p \in \Sigma} E_p$ y $M \setminus \Sigma$.

La variedad M' se puede construir explotando un punto $p_1 \in \Sigma$, obteniendo así una variedad M_1 , un divisor E_{p_1} y un mapeo $\Pi_1: M_1 \rightarrow M$. Como Π_1 es un biholomorfismo entre $M_1 \setminus E_{p_1}$ y $M \setminus \{p_1\}$, alguna vecindad de otro punto $p_2 \in \Sigma \setminus \{p_1\}$ se mapea de manera biholomorfa a la nueva variedad M_1 . Así, podemos aplicar el procedimiento anterior al punto $\Pi_1^{-1}(p_2)$ para obtener otra variedad M_2 , otro divisor E_{p_2} y otro mapeo $\Pi_2: M_2 \rightarrow M_1$ que es un biholomorfismo entre $M_2 \setminus E_{p_2}$ y $M_1 \setminus \{\Pi_1^{-1}(p_2)\}$.

Si repetimos este procedimiento con todos los puntos restantes de Σ , como Σ es un conjunto finito, al final obtendremos una variedad M_n , un divisor E_{p_n} y un mapeo $\Pi_n: M_n \rightarrow M_{n-1}$ que es un biholomorfismo entre $M_n \setminus E_{p_n}$ y $M_{n-1} \setminus \{\Pi_{n-1}^{-1}(p_n)\}$. Si llamamos M' a M_n y Π a $\Pi_1 \circ \dots \circ \Pi_n$, la variedad M' y el mapeo Π satisfacen las propiedades deseadas.

2.7. El grado de una foliación de \mathbb{CP}^2 .

Dada una foliación holomorfa del plano proyectivo complejo \mathbb{CP}^2 se tiene que, como consecuencia del teorema de Chow (el cual afirma que todo subconjunto analítico de una variedad proyectiva es algebraico, ver [2]), ésta es generada, en cualquier carta afín, por un campo vectorial polinomial [1, p. 477].

Si en la carta afín (x, y) , la foliación está generada por el campo vectorial:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= p_1(x, y) + \dots + p_n(x, y) \\ \dot{y} &= q_1(x, y) + \dots + q_n(x, y), \end{aligned} \tag{2.9}$$

donde los p_k, q_k son polinomios homogéneos de grado k , entonces, para obtener un campo vectorial que genere a la foliación en una vecindad de la recta al infinito, consideramos el cambio de coordenadas $x = \frac{1}{u}$ y $y = \frac{v}{u}$. En estas coordenadas el campo vectorial se expresa como:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{u^{n+1}} p_n(1, v) + \dots + \frac{1}{u^2} p_1(1, v) \\ \dot{v} &= \frac{1}{u^{n+2}} (v p_n(1, v) - q_n(1, v)) + \dots + \frac{1}{u^3} (v p_1(1, v) - q_1(1, v)). \end{aligned} \tag{2.10}$$

Si llamamos $h_{k+1} = v p_k(x, y) - x q_k(x, y)$ podemos escribir la ecuación anterior como:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{u^{n+1}} p_n(1, v) + \dots + \frac{1}{u^2} p_1(1, v) \\ \dot{v} &= \frac{1}{u^{n+2}} h_{n+1}(1, v) + \dots + \frac{1}{u^3} h_2(1, v). \end{aligned} \tag{2.11}$$

En esta carta, la recta al infinito queda descrita por $\{u = 0\}$ y entonces, antes de obtener la expresión final del campo vectorial cerca del infinito, podemos multiplicar por una potencia de u adecuada para eliminar los polos. Así, tenemos dos casos distintos:

1. Si $h_{n+1} \neq 0$, entonces diremos que la foliación es *no dicrítica* y así, podemos multiplicar por u^{n+2} para obtener el campo vectorial:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= up_n(1, v) + \cdots + u^n p_1(1, v) \\ \dot{v} &= h_{n+1}(1, v) + uh_n(1, v) + \cdots + u^{n-1}h_2(1, v).\end{aligned}\tag{2.12}$$

Observemos que en este caso, al hacer el cambio de coordenadas, el grado de los polinomios que definen la foliación en la nueva carta es uno más que el grado de los polinomios que definen la foliación en la carta inicial. Además, la recta al infinito $\{u = 0\}$ es invariante y tiene singularidades en los puntos $(0, v_j)$ donde v_j es una raíz del polinomio $h_{n+1}(1, v)$.

2. Si $h_{n+1} \equiv 0$, diremos que la foliación es *dicrítica* y entonces basta multiplicar por u^{n+1} para obtener:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= p_n(1, v) + \cdots + u^{n-1}p_1(1, v) \\ \dot{v} &= h_n(1, v) + \cdots + u^{n-2}h_2(1, v).\end{aligned}\tag{2.13}$$

En este caso volvemos a obtener un campo vectorial polinomial del mismo grado que el campo vectorial original pero ahora la recta al infinito ya no es invariante. En efecto, la foliación corta de manera transversal a la recta al infinito salvo en las raíces del polinomio $p_n(1, v)$, en estos puntos tenemos tangencias que se vuelven puntos singulares si $p_n(1, v)$ y $h_n(1, v)$ tienen raíces en común.

En el caso dicrítico, el polinomio h_{n+1} se anula idénticamente y esto se traduce a que

$$yp_n(x, y) = xq_n(x, y).\tag{2.14}$$

Si evaluamos esta expresión en los puntos $(1, y)$ obtenemos $yp_n(1, y) = q_n(1, y)$ y entonces, $\deg(p_n(1, y)) = \deg(q_n(1, y)) - 1 < n$ y esto quiere decir que el polinomio $p_n(x, y)$ no tiene monomios de la forma ay^n . Un razonamiento similar nos permite concluir que $q_n(x, y)$ no tiene monomios de la forma bx^n .

Como el polinomio p_n es homogéneo de grado n y no hay monomios de la forma ay^n , todos los monomios de p_n tienen una potencia de x y por la misma razón, todos los monomios del polinomio q_n tienen una potencia de y . Así, podemos escribir a p_n y q_n como

$$\begin{aligned}p_n(x, y) &= xf(x, y) \\ q_n(x, y) &= yg(x, y).\end{aligned}\tag{2.15}$$

Además, los polinomios f y g son homogéneos de grado $n-1$. Si insertamos estas dos últimas igualdades en (2.14) obtenemos:

$$xyf(x, y) = xyg(x, y)\tag{2.16}$$

Entonces, al cancelar el factor xy de ambos lados de la igualdad (2.16) se tiene que,

$$f(x, y) = g(x, y).\tag{2.17}$$

Todo lo anterior quiere decir que, una foliación dicrítica siempre la podemos escribir de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= p_1(x, y) + \cdots + p_d(x, y) + xg(x, y) \\ \dot{y} &= q_1(x, y) + \cdots + q_d(x, y) + yg(x, y),\end{aligned}\tag{2.18}$$

con $g(x, y)$ un polinomio homogéneo de grado d .

En el caso de una foliación no dicrítica, vimos que el grado de los polinomios que definen a la foliación no son invariantes bajo cambios de coordenadas. Es por eso que si queremos asociar un grado a una foliación de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ debemos encontrar otra manera de mirar a una foliación de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$.

Si en \mathbb{C}^3 consideramos una 1-forma diferencial $\Omega = A dx + B dy + C dz$, donde $A, B, C \in \mathbb{C}[x, y, z]$ son polinomios homogéneos de grado $d + 1$, el conjunto $\{\Omega = 0\}$ define una distribución de planos en \mathbb{C}^3 . Podemos pensar que Ω asocia a un punto (x_0, y_0, z_0) el kernel de la transformación lineal $A(x_0, y_0, z_0)x + B(x_0, y_0, z_0)y + C(x_0, y_0, z_0)z$.

Si queremos que Ω , al proyectar en la carta afín de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$, $z = 1$ siga asociando a cada punto $[x_0 : y_0 : z_0]$ ya no un plano sino una recta, el plano original debe contener a la dirección determinada por $[x_0 : y_0 : z_0]$. Por ejemplo, si Ω asocia al punto $(0, 0, 1)$ el plano $x + z = 0$, al proyectar en el plano $z = 1$, el plano $x + z = 0$ se proyecta en la recta $x = -1$ y esta recta ni siquiera pasa por el punto $(0, 0)$ que es el representante de la clase $[0 : 0 : 1]$ en el plano $z = 1$.

Una manera de evitar lo anterior es pedir que:

$$xA(x, y, z) + yB(x, y, z) + zC(x, y, z) = 0 \quad \forall x, y, z \in \mathbb{C}^3.\tag{2.19}$$

Lo anterior es equivalente a pedir que la distribución de planos que define $\{\Omega = 0\}$ contenga al campo vectorial radial:

$$V = x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} + z \frac{\partial}{\partial z}.\tag{2.20}$$

Así, cualquier 1-forma diferencial $\Omega = A dx + B dy + C dz$ con coeficientes polinomiales homogéneos de grado $d + 1$ que satisface la condición (2.19), define una foliación de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ que en la carta afín $z = 1$ adquiere la forma:

$$\omega = A(x, y, 1) dx + B(x, y, 1) dy.\tag{2.21}$$

Observemos que el coeficiente C desaparece por que si $z = 1$, entonces $dz = 0$.

Recíprocamente, si en una carta afín de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ una foliación está generada por la 1-forma $\omega = p(x, y) dx + q(x, y) dy$ con $p, q \in \mathbb{C}[x, y]$ polinomios de grado d , entonces podemos levantar ω a una 1-forma Ω de \mathbb{C}^3 con coeficientes polinomiales homogéneos que satisface la identidad (2.19). En efecto, si escogemos los coeficientes A y B como:

$$A(x, y, z) = z^{d+1} p\left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z}\right)\tag{2.22}$$

$$B(x, y, z) = z^{d+1} q\left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z}\right).\tag{2.23}$$

Entonces, la identidad (2.19) obliga a que:

$$C(x, y, z) = z^{-1}(xA(x, y, z) + yB(x, y, z)). \quad (2.24)$$

Es decir, para obtener a los polinomios homogéneos A y B de los polinomios p y q respectivamente, homogeneizamos a los polinomios p y q y después los multiplicamos por z .

Una observación muy importante que nos va a permitir definir el grado de una foliación de \mathbb{CP}^2 es que, el grado de una 1-forma polinomial Ω de \mathbb{C}^3 es invariante bajo transformaciones del grupo general lineal $GL(3, \mathbb{C})$ y en consecuencia es invariante bajo el grupo de transformaciones proyectivas $PGL(3, \mathbb{C})$ de \mathbb{CP}^2 .

Definición 2.7.1. Sea \mathcal{F} una foliación de \mathbb{CP}^2 . Si en coordenadas homogéneas esta foliación está generada por la 1-forma $\Omega = A dx + B dy + C dz$ con coeficientes polinomiales homogéneos de grado $d + 1$ sin factores en común, diremos que la foliación \mathcal{F} tiene *grado* d .

Un resultado que será muy importante y que probaremos más adelante es que toda foliación de grado d tiene, contando multiplicidades, $d^2 + d + 1$ puntos singulares. Es por eso que a pesar de que la foliación esté generada, en coordenadas homogéneas, por una 1-forma de grado $d + 1$ diremos que la foliación tiene grado d . Cabe mencionar que algunos autores no hacen esta convención y definen el grado de una foliación como el grado de la 1-forma que genera a la foliación en coordenadas homogéneas.

A continuación veremos algunas propiedades que cumplen los polinomios A, B, C de la 1-forma $\Omega = A dx + B dy + C dz$ que nos van a ayudar a probar que el número de puntos singulares que tiene la foliación generada por $\{\Omega = 0\}$ es $d^2 + d + 1$.

Si tenemos una foliación dada por la 1-forma $\Omega = A dx + B dy + C dz$ entonces podemos escribir a A y a B de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} A &= a_{d+1} + a_d z + \cdots + a_1 z^d + a_0 z^{d+1} \\ B &= b_{d+1} + b_d z + \cdots + b_1 z^d + b_0 z^{d+1}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

donde los $a_k, b_k \in \mathbb{C}[x, y]$ son polinomios homogéneos de grado k . Entonces tenemos que:

$$xA + yB = (xa_{d+1} + yb_{d+1}) + (xa_d + yb_d)z + \cdots + (xa_1 + yb_1)z^d + (xa_0 + yb_0)z^{d+1}. \quad (2.26)$$

De la identidad (2.19) tenemos que $-zC = xA + yB$. Es decir que z divide al polinomio $xA + yB$ y en consecuencia tenemos que:

$$xa_{d+1} + yb_{d+1} \equiv 0. \quad (2.27)$$

Razonando de manera análoga a la hecha con la ecuación (2.14) y suponiendo que alguno de los polinomios a_{d+1}, b_{d+1} no es idénticamente cero, podemos concluir que:

$$\begin{aligned} a_{d+1} &= -yg(x, y) \\ b_{d+1} &= xg(x, y), \end{aligned} \quad (2.28)$$

con $g(x, y)$ un polinomio homogéneo de grado d .

Si miramos a la foliación definida por $\{\Omega = 0\}$ en la carta $z = 1$ obtenemos la 1-forma $\omega = A(x, y, 1) dx + B(x, y, 1) dy$, y si usamos las ecuaciones (2.25) y (2.28) obtenemos que ω adquiere la forma:

$$\omega = (a_0 + a_1 \cdots + a_d - yg) dx + (b_0 + b_1 + \cdots + b_d + xg) dy, \quad (2.29)$$

donde a_j, b_j son polinomios homogéneos de grado j en x, y . Esta 1-forma genera la misma foliación que el campo vectorial:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= b_0 + b_1 + \cdots + b_d + xg \\ \dot{y} &= -a_0 - a_1 + \cdots - a_d + yg. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Podemos resumir lo anterior en el siguiente lema:

Lema 2.7.1. *Sea \mathcal{F} una foliación de grado d en \mathbb{CP}^2 . Entonces en cualquier carta afín \mathcal{F} está generada por un campo vectorial de la forma:*

$$\begin{aligned} \dot{x} &= b_0 + b_1 + \cdots + b_d + xg \\ \dot{y} &= a_0 + a_1 + \cdots + a_d + yg. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Donde $a_k, b_k \in \mathbb{C}[x, y]$ son polinomios homogéneos de grado k y $g \in \mathbb{C}[x, y]$ es un polinomio homogéneo de grado d o $g(x, y)$ es el polinomio cero.

Es fácil convencerse, usando la expresión (2.11), que el caso no dicrítico se da cuando $g(x, y) \equiv 0$ y el caso dicrítico se da cuando $g(x, y)$ no se anula idénticamente.

Como mencionamos anteriormente, podemos pensar que toda foliación en una dos variedad analítica M sólo tiene singularidades aisladas, y en caso de que M sea compacta, sólo hay un número finito de ellas. Así, como \mathbb{CP}^2 es compacto, cualquier foliación de él tiene un número finito de singularidades y esto nos permite encontrar una carta afín en la cual la recta al infinito no tiene singularidades. Vamos a usar esta observación en la prueba del siguiente teorema:

Teorema 2.7.1. *Sea \mathcal{F} una foliación de grado d . Entonces, contando multiplicidades, \mathcal{F} tiene $d^2 + d + 1$ puntos singulares.*

Demostración. Si escogemos una carta afín en la cual la recta al infinito no tenga puntos singulares, como todas las foliaciones no dicríticas tienen puntos singulares en la recta al infinito, en esta carta afín el campo vectorial que genera a la foliación es dicrítico y adquiere la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= b_0 + b_1 + \cdots + b_d + xg \\ \dot{y} &= a_0 + a_1 + \cdots + a_d + yg, \end{aligned}$$

con g un polinomio homogéneo de grado d . Las dos curvas algebraicas que definen esta ecuación son de grado $d + 1$ así que, por el Teorema de Bézout, estas dos curvas se intersecan, contando multiplicidades, en $d^2 + 2d + 1$ puntos singulares. Cualquiera de estos puntos de intersección que esté en nuestra carta afín va a ser un punto singular de la foliación, pero los puntos de intersección de estas dos curvas en la recta al infinito, gracias a la manera en que escogimos nuestras coordenadas, no son puntos singulares de la foliación. Por lo tanto, para probar el teorema basta demostrar que las dos curvas algebraicas que definen la ecuación se intersecan d veces en la recta al infinito.

Para ver en qué puntos la curva $\{A = a_0 + \cdots + a_d + yg = 0\}$ interseca a la recta al infinito tenemos que homogeneizar al polinomio A y después evaluar en $z = 0$. Si homogeneizamos al polinomio A obtenemos el polinomio $a_0z^d + \cdots + a_dz + yg$, y al evaluar en $z = 0$ vemos que esta curva corta a la recta al infinito en el punto $[1 : 0 : 0]$ y en los puntos determinados por las raíces del polinomio g . De manera análoga la curva $\{B = b_0 + b_1 + \cdots + b_d + xg\}$ corta a la recta al infinito en los puntos $[0 : 1 : 0]$ y en los puntos determinados por las raíces de g . Como g es un polinomio de grado d , las dos curvas se intersecan d veces en la recta al infinito.

□

Capítulo 3

Las hojas algebraicas de una foliación de \mathbb{CP}^2 .

3.1. El problema de Poincaré

Dada una foliación \mathcal{F} de \mathbb{CP}^2 es importante saber cuándo esta foliación tiene una primera integral meromorfa. Una *primera integral meromorfa* para una foliación \mathcal{F} de \mathbb{CP}^2 es una función $H(x, y, z) = \frac{f(x, y, z)}{g(x, y, z)}$, donde $f, g \in \mathbb{C}[x, y, z]$ son polinomios homogéneos del mismo grado cuyas curvas de nivel resultan ser las hojas de la foliación \mathcal{F} . Notemos que H efectivamente define una función en casi todos los puntos de \mathbb{CP}^2 , en efecto, al ser f, g polinomios del mismo grado n tenemos que $\frac{f(\lambda x, \lambda y, \lambda z)}{g(\lambda x, \lambda y, \lambda z)} = \frac{\lambda^n f(x, y, z)}{\lambda^n g(x, y, z)} = \frac{f(x, y, z)}{g(x, y, z)}$. En los únicos puntos donde no hay un valor bien definido son los puntos que son ceros comunes de f, g . Veamos qué sucede en esos puntos, sea $Z(f, g)$ el conjunto de ceros en común de f y g , si restringimos la función $H = \frac{f}{g}$ al conjunto $\mathbb{CP}^2 \setminus Z(f, g)$ entonces las curvas de nivel $\{H = c\}$ coinciden con los conjuntos $L_c := \{f - cg = 0\}$. Observemos que para todo $x \in Z(f, g)$ se tiene que $x \in L_c$ para toda $c \in \mathbb{C}$. Esto quiere decir que los puntos de $Z(f, g)$ están en la cerradura de L_c en \mathbb{CP}^2 para toda $c \in \overline{\mathbb{C}}$.

Si en la carta afín $z = 1$ la foliación \mathcal{F} está generada por los ceros de la 1-forma diferencial $\omega = a(x, y) dx + b(x, y) dy$ entonces H es una primera integral de la foliación \mathcal{F} si y sólo si

$$g^2 dH = gdf - fdg = r\omega. \quad (3.1)$$

Por lo tanto, para comprobar si la foliación generada por $\{\omega = 0\}$ tiene una primera integral meromorfa basta ver si existen polinomios f, g del mismo grado y r un polinomio que satisfagan la ecuación 3.1. El problema con la ecuación 3.1 es que los grados de los polinomios f, g y r , en caso de que existan, pueden ser muy grandes. Sin embargo, si de alguna manera tuvieramos una cota para el grado de una posible hoja algebraica (una hoja L es *algebraica* si existe un polinomio p tal que $L = \{p = 0\}$) los grados de los polinomios de la ecuación 3.1 también están acotados y entonces es más plausible intentar resolver la ecuación 3.1 y así saber si la foliación generada por $\{\omega = 0\}$ tiene una primera integral racional.

El problema de Poincaré para foliaciones de \mathbb{CP}^2 consiste en acotar, dada una foliación, el grado de una posible solución algebraica en términos del grado de la foliación.

Ejemplo 3.1.1. Consideremos la siguiente familia de ecuaciones diferenciales en \mathbb{CP}^2 a un parámetro $\lambda \in \mathbb{R}$:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= x \\ \dot{y} &= \lambda y.\end{aligned}$$

O lo que es lo mismo, la foliación generada por los ceros de la 1-forma $x dy - \lambda y dx$.

En el ejemplo anterior si λ es un número irracional, la foliación definida por la ecuación diferencial sólo tiene tres hojas algebraicas invariantes, los dos ejes coordenados y la recta al infinito. En efecto, si existiera una hoja algebraica de grado n , el teorema de Bézout nos asegura que esta hoja intersecaría a la recta $x = 1$ en n puntos, pero la holonomía asociada a la separatriz $y = 0$ y la transversal $x = 1$ es $z \mapsto e^{2\pi i \lambda} z$, y como λ es irracional, la órbita de cada punto es infinita. Además, por construcción de la holonomía, la órbita de un punto z está contenida en la intersección de la hoja de la foliación \mathcal{L}_z que pasa por z con la transversal $x = 1$. Esto implica que la hoja \mathcal{L}_z y la transversal se intersecan en una infinidad de puntos. Así \mathcal{L}_z no es algebraica.

Por otro lado, si $\lambda = \frac{p}{q}$, entonces $H = \frac{y^q}{x^p}$ es una primera integral racional ya que $dH = q \frac{y^{q-1}}{x^p} dy - p \frac{y^q}{x^{p+1}} dx = \frac{y^{q-1}}{x^{p+1}} (qx dy - py dx)$ y así, todas las hojas $y^q - cx^p = 0$ son algebraicas.

La ecuación del ejemplo anterior es lineal y eso hace que el grado de la foliación que genera sea uno. Sin embargo, es fácil ver que para todo número natural k siempre hay algún parámetro λ para el cual se cumplen las siguientes dos propiedades:

1. La foliación correspondiente a ese parámetro \mathcal{F}_λ tiene una primera integral racional y por lo tanto todas sus hojas son algebraicas.
2. El grado de las hojas de la foliación es mayor que k .

En efecto, basta tomar $\lambda = \frac{1}{n}$ con $n > k$ pues así las hojas de la foliación corresponden a $y^n - cx = 0$.

El ejemplo anterior muestra que si no ponemos algunas condiciones más restrictivas a la foliación, no podemos acotar el grado de las soluciones algebraicas.

Si suponemos que la foliación \mathcal{F} tiene una hoja algebraica $C = \{f = 0\}$, $f \in \mathbb{C}[x, y]$ y que además la hoja algebraica C es suave o sólo se autointerseca de manera transversal se tiene el siguiente resultado:

Teorema 3.1.1. [D. Cerveau, A. Lins Neto] Sea \mathcal{F} una foliación de grado d y C una hoja algebraica de grado m de la foliación \mathcal{F} .

Si la curva C es suave o a lo más tiene autointersecciones transversales, entonces $m \leq d + 2$.

En lugar de pedir condiciones a la hoja algebraica, podemos suponer que la foliación no tiene singularidades dicríticas.

Teorema 3.1.2. *[M. Carnicer] Si una foliación \mathcal{F} de grado d no tiene puntos singulares dicríticos, entonces cualquier hoja algebraica de la foliación es de grado $m \leq d + 2$.*

Para ver una demostración de estos teoremas véase [1, pp. 479,480], en donde la cota $d + 2$ que aparece en ambos teoremas aparece como $d + 1$. Esto se debe a que en este texto se define el grado de una foliación como uno más el grado de la foliación que definimos aquí. Asimismo en el texto se prueba un resultado más fuerte que el teorema 3.1.2.

3.2. Escasez de foliaciones con hojas algebraicas.

En esta sección veremos que de manera genérica una foliación de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ no tiene hojas algebraicas. Para precisar qué quiere decir que algo suceda de manera genérica haremos algunas observaciones.

El conjunto $\mathbb{L}_{P,d+1}$ de polinomios homogéneos de grado $d + 1$ junto con el polinomio cero es un espacio vectorial y por lo tanto, el conjunto de 1-formas diferenciales en \mathbb{C}^3 con coeficientes polinomiales homogéneos de grado $d + 1$ junto con la 1-forma constante cero, es un espacio vectorial. Como se vio en la sección 2.7, para que una 1-forma $\omega = A dx + B dy + C dz$ homogénea de grado $d + 1$ defina una foliación en $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ basta que se satisfaga la condición (2.19), $xA + yB + zC = 0$. Notemos que si ω, ω' son 1-formas homogéneas de grado $d + 1$ que satisfacen la condición (2.19) entonces $\omega + \omega'$ y $\lambda\omega, \lambda \in \mathbb{C}$ también satisfacen la condición (2.19). Así, el conjunto $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$ de 1-formas con coeficientes polinomiales homogéneos de grado $d + 1$ que satisfacen la condición (2.19) junto con el cero, es un espacio vectorial.

Si los coeficientes de $\Omega \in \mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$ tienen un factor g en común, entonces el grado de la foliación que determina $\{\Omega = 0\}$ es $d - \deg(g)$. Así, si una foliación \mathcal{F} de grado $n \leq d$ es generada por la 1-forma Ω' entonces, si multiplicamos a Ω' por un polinomio homogéneo g de grado $d - n$, la 1-forma $\Omega = g\Omega'$ genera a la misma foliación \mathcal{F} y $\Omega \in \mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$. Es decir, en el espacio vectorial $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$ están todas las foliaciones de grado menor o igual a d .

En lo que sigue vamos a denotar por $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$ al espacio vectorial de foliaciones de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ de grado menor o igual a d , $\mathbb{L}_{P,m} \subset \mathbb{C}[x, y, z]$ va a denotar al espacio de todos los polinomios homogéneos de grado m y $\mathbb{L}_{2,d}$ va a denotar al espacio vectorial de 2-formas homogéneas de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ de grado d junto con el cero.

Como $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$ es un espacio vectorial, podemos introducir en él la medida de Lebesgue usual y entonces podemos afirmar que, salvo en un conjunto de medida cero, cualquier foliación de grado d no tiene hojas algebraicas. Para dar una idea de la demostración de este hecho consideremos $f \in \mathbb{C}[x, y, z]$ un polinomio homogéneo de grado m y una foliación \mathcal{F} de grado d generada por la 1-forma Ω . Si $C = \{f = 0\}$ es una curva invariante de \mathcal{F} entonces en los puntos $p \in C$, df y Ω determinan el mismo subespacio lineal y en consecuencia $(\Omega \wedge df)_p = 0$. Esto quiere decir que la 2-forma $\Omega \wedge df$ se anula en toda la curva $C = \{f = 0\}$ y por lo tanto,

$$\Omega \wedge df = f\Phi. \quad (3.2)$$

Notemos que la 2-forma Φ es polinomial y homogénea de grado d (esto se debe a que los coeficientes de Ω son de grado $d + 1$ y df tiene grado $m - 1$), y si un par $(f, \Phi) \in \mathbb{L}_{f,m} \times \mathbb{L}_{\Phi,d}$

satisface la ecuación (3.2) entonces $C = \{f = 0\}$ es una curva invariante de la foliación determinada por $\{\Omega = 0\}$.

Con todo lo anterior, la ecuación (3.2) define una variedad algebraica Q en el espacio $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d} \times \mathbb{L}_{P,m} \times \mathbb{L}_{2,d}$. En efecto, la operación \wedge sólo involucra sumas y productos, así $\Omega \wedge df - f\Phi = 0$ determina tres polinomios (para especificar una 2-forma en \mathbb{C}^3 necesitamos tres coeficientes) en el espacio afín $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d} \times \mathbb{L}_{P,m} \times \mathbb{L}_{2,d}$. Por lo tanto, la proyección de la variedad algebraica Q en el espacio $\mathbb{L}_{\mathcal{F},d}$ es el conjunto de todas las foliaciones de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ de grado $r \leq d$ que tienen una hoja algebraica de grado $n \leq m$. Como las 1-formas ω y $\lambda\omega$, $\lambda \neq 0$ generan la misma foliación podemos proyectivizar a $\Pi(Q)$. Veremos que la proyectivización de $\Pi(Q)$ es una variedad algebraica en $\mathbb{P}(\mathbb{L}_{\mathcal{F},d})$. Para eso requeriremos algunos resultados y definiciones.

Definición 3.2.1. Sean $[x_0, \dots, x_n]$ coordenadas homogéneas de $\mathbb{C}\mathbb{P}^n$. Si $L^{k-1} \subset \mathbb{C}\mathbb{P}^n$ es un subespacio lineal definido por los ceros en común de las $n - k + 1$ formas lineales $y_i = \sum_{j=0}^n a_{ij}x_j$, $0 \leq i \leq n - k$ definimos la proyección de $\mathbb{C}\mathbb{P}^n$ con centro en L^k ,

$$p_L: \mathbb{C}\mathbb{P}^n \setminus L^{k-1} \rightarrow \mathbb{C}\mathbb{P}^{n-k},$$

como

$$[b_0, \dots, b_n] \rightarrow \left[\sum_{j=0}^n a_{0j}b_j, \dots, \sum_{j=0}^n a_{(n-k)j}b_j \right].$$

A continuación vamos a proyectivizar muchos espacios vectoriales complejos, es por eso que si V es un espacio vectorial complejo denotaremos por $\mathbb{P}(V)$ al espacio obtenido al proyectivizar V .

Ejemplo 3.2.1. Si $[x_0, \dots, x_n]$ y $[y_0, \dots, y_m]$ son coordenadas homogéneas de $\mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1})$ y $\mathbb{P}(\mathbb{C}^{m+1})$ respectivamente, un caso particular de la definición anterior y que usaremos más adelante es cuando en $\mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1} \times \mathbb{C}^{m+1})$ proyectamos con centro en $L = \{[0, \dots, 0, y_0, \dots, y_m]\} \simeq \mathbb{P}(\mathbb{C}^{m+1})$. Este subespacio proyectivo queda descrito por $x_0 = \dots = x_n = 0$ y así, la proyección adquiere la expresión sencilla:

$$[x_0, \dots, x_n, y_0, \dots, y_m] \mapsto [x_0, \dots, x_n].$$

Por lo tanto, podemos pensar a la proyección de $\mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1} \times \mathbb{C}^{m+1})$ con centro en $\{0\} \times \mathbb{P}(\mathbb{C}^{m+1})$ como la proyección de $\mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1} \times \mathbb{C}^{m+1})$ en $\mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1}) \times \{0\} \simeq \mathbb{P}(\mathbb{C}^{n+1})$.

Teorema 3.2.1. Si $X \subset \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}\mathbb{P}^p$ es una variedad algebraica, entonces la proyección de X en el primer factor es una variedad algebraica en \mathbb{C}^n .

El resultado anterior es muy sorprendente pues no es difícil convencerse de que si $X \subset \mathbb{C}^n \times \mathbb{C}^m$ es una variedad algebraica, la proyección de X en cualquiera de los dos factores no siempre es una variedad algebraica (por ejemplo, en \mathbb{C}^3 el cero no está en la proyección de $\{xy - 1 = 0\}$ en cualquiera de los dos ejes). El siguiente lema, conocido como el lema de normalización de Noether, es una consecuencia del teorema anterior.

Lema 3.2.1. Si $X \subset \mathbb{C}\mathbb{P}^n$ es una variedad algebraica y $L^k \subset \mathbb{C}\mathbb{P}^n$ es un subespacio que no interseca a X , entonces la proyección con centro en L^k de X en $\mathbb{C}\mathbb{P}^{n-k-1}$ es una variedad algebraica.

Para ver una prueba de los dos resultados anteriores consúltese [2]. Con estos dos resultados podemos probar el siguiente lema,

Lema 3.2.2. *Para todo $d \geq 2$ y $m \geq 1$ las foliaciones de grado $r \leq d$ con una hoja algebraica de grado $n \leq m$ constituyen una variedad algebraica en el espacio $\mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Omega,d})$.*

Demostración. Como vimos anteriormente la ecuación (3.2) determina una variedad algebraica en $\mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{L}_{f,m} \times \mathbb{L}_{\Phi,d}$. Notemos que si f satisface la ecuación (3.2) entonces λf también satisface la ecuación y por lo tanto la variedad algebraica está en $\mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{P}(\mathbb{L}_{f,m}) \times \mathbb{L}_{\Phi,d}$.

Si llamamos Q a esta variedad, por el teorema 3.2.1, la proyección de Q en $\mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{L}_{\Phi,d}$ es una variedad algebraica Q' . Observemos que si (Ω, Φ) satisfacen la ecuación (3.2), $(\lambda\Omega, \lambda\Phi)$ también lo hacen, así podemos proyectivizar a Q' para obtener una variedad algebraica Q'' en $\mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{L}_{\Phi,d})$.

El subespacio $\{0\} \times \mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Phi,d})$ de $\mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{L}_{\Phi,d})$ (véase ejemplo 3.2.1) no interseca a Q'' . En efecto, si $\Omega = 0$ entonces para que la ecuación (3.2) se satisfaga $f = 0$ ó $\Phi = 0$ y el punto $(0, 0) \in \mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{L}_{\Phi,d}$ no está en $\mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Omega,d} \times \mathbb{L}_{\Phi,d})$. Por lo tanto, si hacemos la proyección con centro en $\{0\} \times \mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Phi,d})$ obtenemos una variedad algebraica Q''' en $\mathbb{P}(\mathbb{L}_{\Omega,d})$. Esta variedad algebraica se corresponde con las foliaciones de grado $r \leq d$ con una hoja algebraica de grado $n \leq m$. \square

Una variedad algebraica en un espacio vectorial complejo tiene medida cero a menos que la variedad algebraica sea todo el espacio y entonces tiene medida infinita. Por lo tanto, para demostrar que el conjunto de las foliaciones de grado d con una hoja algebraica de grado m tiene medida cero, basta exhibir una foliación de grado d que no tenga hojas algebraicas.

Un ejemplo, debido a Jouanolou, de una foliación de grado d sin hojas algebraicas es la foliación generada en la carta afín (x, y) por la 1-forma,

$$(x^d - yy^d) dx - (1 - xy^d) dy.$$

Para ver una demostración de este hecho consúltese [1].

3.3. El teorema de Darboux.

A pesar de que una foliación de \mathbb{CP}^2 casi nunca tiene hojas algebraicas, si tomamos una ecuación diferencial polinomial en \mathbb{C}^2 y la foliación que genera tiene más de cierto número de soluciones algebraicas, entonces todas las soluciones son algebraicas.

Si $F = (F_1, F_2)$ es un campo vectorial polinomial de grado r , f un polinomio irreducible de grado m y $C = \{f = 0\}$ que es solución la ecuación diferencial determinada por el campo F entonces, para todo punto $p \in C$ tenemos que,

$$df(F) = \frac{\partial f}{\partial x} F_1 + \frac{\partial f}{\partial y} F_2 = 0. \quad (3.3)$$

Por lo tanto, f divide a la función $df(F)$ y en consecuencia $df(F) = fg$. Como el grado de f es m y el grado de F es r , el grado de g es a lo más $r - 1$. Además, el espacio de los polinomios de grado $n \leq r - 1$ en dos variables tiene dimensión $\frac{1}{2}r(r + 1)$. Estas dos observaciones nos permiten probar el siguiente teorema.

Teorema 3.3.1. *Si una foliación está definida por un campo vectorial F de grado r y tiene $n \geq \frac{1}{2}r(r+1) + 1$ hojas algebraicas $C_k = \{f_k = 0\}, k = 1, \dots, n$, entonces la foliación tiene una primera integral multivaluada $H = f_1^{\lambda_1} \cdots f_n^{\lambda_n}$.*

Demostración. Para cada polinomio f_i que define una curva invariante $C_i = \{f_i = 0\}$ tenemos que $df_i(F) = f_i g_i$ con el grado de g_i , $\deg(g_i) \leq r - 1$. Por lo tanto, si existen $n \geq \frac{1}{2}r(r+1) + 1$ curvas invariantes, entonces los polinomios $g_i, i = 1, \dots, n$, son linealmente dependientes en el espacio de polinomios de grado a lo más $r - 1$ y así, podemos encontrar una combinación lineal de ellos tal que $\lambda_1 g_1 + \cdots + \lambda_n g_n = 0$ con al menos un $\lambda_i \neq 0$. Si $H = f_1^{\lambda_1} \cdots f_n^{\lambda_n}$ entonces tenemos que,

$$dH = \lambda_1 \frac{H}{f_1} df_1 + \cdots + \lambda_n \frac{H}{f_n} df_n = H \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{df_i}{f_i}.$$

Por lo tanto,

$$dH(F) = H \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{df_i(F)}{f_i} = H \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{f_i g_i}{f_i} = H \sum_{i=1}^n \lambda_i g_i = 0.$$

Esto quiere decir que H es una primera integral de la foliación generada por el campo vectorial F . \square

Si hay una solución algebraica más podemos encontrar una primera integral racional.

Teorema 3.3.2. *Si una foliación definida por el campo vectorial polinomial F de grado r tiene $n = \frac{1}{2}r(r+1) + 2$ hojas algebraicas, entonces tiene una primera integral racional.*

Demostración. Si las curvas algebraicas están definidas por los ceros de f_1, \dots, f_n entonces, para algunos λ_i , las funciones $H = f_1^{\lambda_1} \cdots f_{n-1}^{\lambda_{n-1}}$ y $H' = f_2^{\lambda_2} \cdots f_n^{\lambda_n}$ son primeras integrales multivaluadas del campo vectorial F . Así, las 1-formas racionales,

$$\omega = \frac{dH}{H} = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i^{n-1} \frac{df_i}{f_i} \quad \text{y}$$

$$\omega' = \frac{dH'}{H'} = \sum_{i=2}^n \lambda_i^{n-1} \frac{df_i}{f_i},$$

generan la misma foliación y por lo tanto, son proporcionales. Esto quiere decir que existe una función racional h tal que $\omega = h\omega'$. Así, $0 = d\omega = dh \wedge \omega + h d\omega' = dh \wedge \omega$ ya que ω y ω' son exactas. Como $dh \wedge \omega = 0$, dh y ω son proporcionales. Por consiguiente h es una primera integral racional de F . \square

Capítulo 4

La familia de grado 4.

En esta tesis abordaremos un ejemplo, debido a Alcides Lins Neto ([7]), de una familia de foliaciones de \mathbb{CP}^2 de grado fijo en la cual, casi toda foliación de la familia tiene una primera integral racional pero es imposible acotar el grado de ellas. La familia monoparamétrica ($\alpha \in \mathbb{C}$) que estudiaremos consiste de las foliaciones de grado cuatro generadas por las ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (x^3 - 1)(x - \alpha y^2) \\ \dot{y} &= (y^3 - 1)(y - \alpha x^2). \end{aligned} \tag{4.1}$$

Si además de tener una familia de foliaciones de grado fijo no le pedimos algo extra a las foliaciones de la familia, el ejemplo 3.1.1 muestra que en general no es posible acotar el grado de las posibles hojas algebraicas. La familia de foliaciones generada por las ecuaciones 4.1 tiene la particularidad de que para cualesquiera dos foliaciones de la familia, los puntos singulares correspondientes son localmente analíticamente equivalentes, de manera precisa tenemos la siguiente definición:

Definición 4.0.1. Sea $(\mathcal{F}_s)_{s \in S}$ una familia de foliaciones de \mathbb{CP}^2 donde S es una variedad holomorfa tal que los coeficientes de la ecuación que definen a cada foliación de la familia, en una carta afín fija, dependen de manera holomorfa de $s \in S$. Decimos que la familia tiene singularidades de *tipo analítico fijo* si:

1. Las singularidades de \mathcal{F}_s , $s \in S$, se pueden escribir como $\text{sing}(\mathcal{F}_s) = \{p_1(s), \dots, p_k(s)\}$, donde las funciones $s \in S \mapsto p_j(s)$ son holomorfas.
2. Para cada $j \in \{1, \dots, k\}$ y $s_1, s_2 \in S$, existen unas vecindades U_1, U_2 de $p_j(s_1)$ y $p_j(s_2)$ respectivamente, de tal forma que las foliaciones $\mathcal{F}_{s_1}, \mathcal{F}_{s_2}$ son analíticamente equivalentes en estas vecindades.

Si además se cumple que para toda $s \in S$, las singularidades de \mathcal{F}_s tienen dos valores propios distintos de cero, diremos que la familia tiene *singularidades no degeneradas*. El siguiente resultado es un contraejemplo al problema de Poincaré:

TEOREMA PRINCIPAL. *Existe una familia de foliaciones de \mathbb{CP}^2 , digamos $(\mathcal{F}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$, de grado 4 que cumplen:*

1. *Existe un subconjunto finito de parámetros $A \subset \bar{\mathbb{C}}$ tal que la familia restringida, $(\mathcal{F}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}} \setminus A}$ tiene singularidades no degeneradas de tipo analítico fijo.*

2. Existe un subconjunto denso y numerable $E \subset \overline{\mathbb{C}}$, tal que para cualquier $\alpha \in E$, la foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional $F_\alpha = \frac{P_\alpha}{Q_\alpha}$ de grado d_α y se satisface que para cualquier $k > 0$, el conjunto $\{\alpha \in E; d_\alpha \leq k\}$ es finito. Esto nos dice que para todo natural k , hay una infinidad de parámetros $\alpha \in E$ cuya foliación correspondiente \mathcal{F}_α tiene primera integral racional de grado mayor que k y es por lo tanto un contraejemplo al problema de Poincaré.

El problema de Painlevé consiste en acotar el género de una hoja algebraica mediante el grado de una primera integral racional para la foliación. En el mismo artículo [7], Lins Neto prueba que casi cualquier hoja de las foliaciones determinadas por las ecuaciones 4.1 tiene género uno. Sin embargo, al jalar esta familia con algunos mapeos $F: \mathbb{CP}^2 \rightarrow \mathbb{CP}^2$ obtiene familias de foliaciones con primeras integrales racionales de grado arbitrariamente grande en la cual las hojas también tienen género arbitrariamente grande. En este trabajo también estudiaremos estas familias.

4.1. La configuración.

En la sección 4.2 haremos una construcción explícita de la familia deseada. Para ello, en esta sección definiremos la configuración de rectas y puntos que habrán de quedar invariantes por dicha familia de ecuaciones. Cada foliación de esta familia tiene como hojas invariantes a nueve rectas que se intersecan en doce puntos. Estas nueve rectas y doce puntos cumplen ciertas propiedades y veremos que si una foliación de grado cuatro deja invariantes a nueve rectas y doce puntos que cumplen las mismas propiedades, entonces en coordenadas adecuadas la foliación está generada por la ecuación (4.1) para algún $\alpha \in \mathbb{C}$. Veremos también algunas propiedades de la configuración que nos permitirán reducir los cálculos a puntos ó rectas particulares de ésta. De aquí en adelante, denotaremos por $j = e^{\frac{2\pi i}{3}}$.

La familia de grado cuatro deja invariante a las nueve rectas con ecuaciones $\{x = 1\}, \{x = j\}, \{x = j^2\}, \{y = 1\}, \{y = j\}, \{y = j^2\}, \{y = x\}, \{y = jx\}, \{y = j^2x\}$.

Estas 9 rectas se intersectan en 12 puntos los cuales son $(1, 1), (1, j), (1, j^2), (j, 1), (j, j), (j, j^2), (j^2, 1), (j^2, j), (j^2, j^2), [0 : 0 : 1], [0 : 1 : 0]$ y $[1 : 0 : 0]$.

Denotemos por \mathcal{L} al conjunto de las 9 rectas, por \mathcal{P} al conjunto de los 12 puntos y por $\mathcal{C} = (\mathcal{L}, \mathcal{P})$ a la configuración de las 9 rectas y los 12 puntos.

Observemos que la configuración cumple las siguientes tres propiedades:

Propiedades de \mathcal{C} .

1. Cada recta tiene 4 puntos de la configuración.
2. Por cada punto de la configuración pasan 3 rectas de la configuración
3. Si 3 puntos de \mathcal{P} no están en una recta de la configuración, entonces no están alineados.

A continuación probaremos que, módulo transformaciones proyectivas, ésta es la única configuración de 9 rectas y 12 puntos que satisfacen las tres propiedades anteriores. Esta proposición y sus dos corolarios serán de gran utilidad en el futuro, pues como dijimos previamente, muchos cálculos se reducirán a hacer un cálculo en un lugar particular de \mathbb{CP}^2

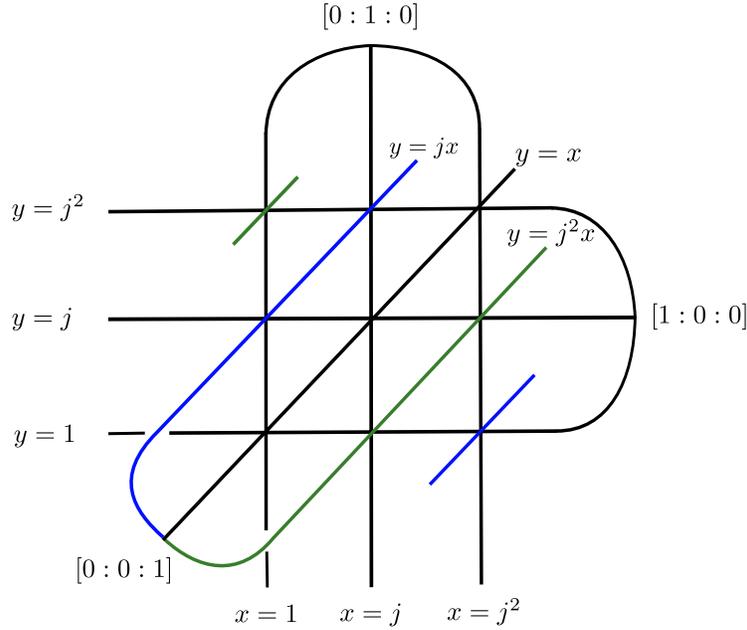


Figura 4.1: La configuración.

y después usaremos alguna transformación proyectiva para argumentar que el cálculo es válido en otros lugares de \mathbb{CP}^2 .

Sea $\mathcal{C}' = (\mathcal{L}', \mathcal{P}')$ una configuración de 9 rectas y 12 puntos que satisfacen las tres propiedades de arriba. Es importante recordar que los 12 puntos son las intersecciones de las nueve rectas.

Lema 4.1.1. \mathcal{P}' puede ser dividido en cuatro conjuntos, $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \mathcal{P}_3, \mathcal{P}_4$, tales que:

1. Cada \mathcal{P}_i tiene tres elementos de \mathcal{P}' .
2. $\mathcal{P}_i \cap \mathcal{P}_k = \emptyset$ si $i \neq j$
3. Los tres puntos en cada \mathcal{P}_i no son colineales.

Demostración. Sea $p_1 \in \mathcal{P}'$, entonces, por la propiedad 2 de la configuración, hay tres rectas $l_1, l_2, l_3 \in \mathcal{L}'$, que pasan por p_1 . Por la propiedad 1, cada una de estas rectas tiene tres puntos de \mathcal{P}' distintos de p_1 . Por lo tanto, de los doce puntos de \mathcal{P}' , nueve están unidos a p_1 con una recta de \mathcal{L}' . Así, la recta que une a los dos puntos restantes, $p_2, p_3 \in \mathcal{P}'$ no es una recta de la configuración y entonces, por la propiedad 3, p_1, p_2, p_3 , no son colineales. Llamemos $\mathcal{P}_1 = \{p_1, p_2, p_3\}$.

Ahora, si $l_4, l_5, l_6 \in \mathcal{L}'$ son las tres rectas que pasan por p_2 , entonces, por el teorema de Bézout, $\{l_1, l_2, l_3\}$ intersecciona a $\{l_4, l_5, l_6\}$ en nueve puntos de \mathcal{P}' , y como ninguno de ellos puede ser p_1 ó p_3 , concluimos que deben ser los mismos nueve que descartamos al elegir a p_2 y a p_3 . Es decir, si a p_2 le asociamos otros dos puntos de \mathcal{P}' como a p_1 , los puntos que le

corresponden son p_1 y p_3 .

Por lo tanto, la construcción anterior parte a \mathcal{P}' en cuatro conjuntos con las propiedades deseadas. \square

En el caso particular en que $\mathcal{P}' = \mathcal{P}$ los conjuntos \mathcal{P}_i son: $\mathcal{P}_1 = \{(0, 0), [1 : 0 : 0][0 : 1 : 0]\}$, $\mathcal{P}_2 = \{(1, 1), (j, j^2), (j^2, j)\}$, $\mathcal{P}_3 = \{(1, j), (j, 1), (j^2, j^2)\}$ y $\mathcal{P}_4 = \{(1, j^2), (j, j), (j^2, 1)\}$.

Proposición 4.1.1. Sean \mathcal{C}' , $\mathcal{P}_i = \{p_1, p_2, p_3\}$ como en el lema 4.1.1. Entonces existe un automorfismo T de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ tal que $T(\mathcal{C}') = \mathcal{C}$ (i.e. $T(\mathcal{L}') = \mathcal{L}$, $T(\mathcal{P}') = \mathcal{P}$) y además $T(\mathcal{P}_i) = \{[1 : 0 : 0], [0 : 1 : 0], [0 : 0 : 1]\}$

Demostración. Como los puntos de \mathcal{P}_i no son colineales, podemos encontrar coordenadas de tal forma que: $p_1 = [0 : 0 : 1]$ $p_2 = [0 : 1 : 0]$ $p_3 = [1 : 0 : 0]$. En estas coordenadas y en la carta afín $z = 1$, las rectas por $p_2 = [0 : 1 : 0]$ son de la forma $x = a_1$, $x = a_2$, $x = a_3$ y las que pasan por $p_3 = [1 : 0 : 0]$ son de la forma $y = b_1$, $y = b_2$, $y = b_3$. Así, las tres rectas restantes (las que pasan por $p_1 = [0 : 0 : 1]$) tienen la forma $y = \alpha x$, $y = \beta x$, $y = \gamma x$ y los nueve puntos restantes de \mathcal{P}' son (a_1, b_1) (a_1, b_2) (a_1, b_3) (a_2, b_1) (a_2, b_2) (a_2, b_3) (a_3, b_1) (a_3, b_2) (a_3, b_3)

Reordenando los índices, podemos suponer que $(a_i, b_i) \in \{y = \alpha x\}$, $i = 1, 2, 3$. i.e. $\frac{b_i}{a_i} = \alpha$, $i = 1, 2, 3$.

Supongamos que (a_1, b_2) está en la recta $\{y = \beta x\}$. Veamos qué otros puntos de \mathcal{P}' están en $\{y = \beta x\}$. Notemos primero que estos puntos no pueden tener en su primera entrada a a_1 y en la segunda entrada no pueden tener a b_2 , como además, (a_3, b_3) ya está en $\{y = \alpha x\}$, las únicas posibilidades son: (a_2, b_3) , (a_2, b_1) y (a_3, b_1) . Pero (a_2, b_3) y (a_2, b_1) no pueden estar ambos en $\{y = \beta x\}$, así que forzosamente, $(a_3, b_1) \in \{y = \beta x\}$. De manera análoga, (a_2, b_1) y (a_3, b_1) no pueden estar ambos en $\{y = \beta x\}$ y entonces $(a_2, b_3) \in \{y = \beta x\}$.

Por lo tanto, (a_1, b_1) , (a_2, b_2) , $(a_3, b_3) \in \{y = \alpha x\}$.
 (a_1, b_2) , (a_2, b_3) , $(a_3, b_1) \in \{y = \beta x\}$.
 (a_1, b_3) , (a_2, b_1) , $(a_3, b_2) \in \{y = \gamma x\}$.

Y entonces, tenemos las siguientes relaciones:

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{b_3}{a_3} = \alpha, \quad \frac{b_2}{a_1} = \frac{b_3}{a_2} = \frac{b_1}{a_3} = \beta, \quad \frac{b_3}{a_1} = \frac{b_1}{a_2} = \frac{b_2}{a_3} = \gamma.$$

Lo anterior implica que $\alpha^3 = \beta^3 = \gamma^3$ y así, $\frac{\beta}{\alpha}$ y $\frac{\gamma}{\alpha}$ son raíces cúbicas distintas de la unidad, digamos j y j^2 respectivamente.

Por último, veamos que $(a_1, a_2, a_3) = a_1(1, j, j^2)$ y $(b_1, b_2, b_3) = \alpha a_1(1, j, j^2)$:

$$a_1 j = a_1 \frac{\beta}{\alpha} = a_1 \frac{\frac{b_2}{a_1}}{\frac{b_1}{a_1}} = a_2, \quad a_1 j^2 = a_1 \frac{\gamma}{\alpha} = a_1 \frac{\frac{b_3}{a_1}}{\frac{b_1}{a_1}} = a_3.$$

Y como $\frac{b_i}{a_i} = \alpha$ $i = 1, 2, 3$

$$b_1 = \alpha a_1, \quad b_2 = \alpha a_2 = \alpha a_1 j, \quad b_3 = \alpha a_3 = \alpha a_1 j^2.$$

Y así, finalmente, $T([x : y : z]) = [a_1^{-1}x : (\alpha a_1)^{-1}y : z]$ cumple las condiciones de la proposición. □

De la proposición anterior se siguen los siguientes dos corolarios:

Corolario 4.1.1. *Dados dos conjuntos $\mathcal{P}_i \neq \mathcal{P}_k$, existe un automorfismo S de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ tal que $S(\mathcal{C}') = \mathcal{C}'$ y $S(\mathcal{P}_i) = \mathcal{P}_k$.*

Demostración. Por la proposición 1, existen dos automorfismos R, T de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ tales que, $R(\mathcal{C}') = \mathcal{C} = T(\mathcal{C}')$ y $R(\mathcal{P}_i) = \{[1 : 0 : 0], [0 : 1 : 0], [0 : 0 : 1]\} = T(\mathcal{P}_k)$. Entonces, el automorfismo buscado es: $S = T^{-1} \circ R$. □

Corolario 4.1.2. *Dados $p_i, p_j \in \mathcal{P}'$ existe un automorfismo S de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ tal que $S(\mathcal{C}') = \mathcal{C}'$ y $S(p_i) = p_j$.*

Demostración. Primero, observemos que en la transformación que encontramos en la proposición 1, podemos escoger las imágenes de los puntos de \mathcal{P}_i como queramos. Entonces, basta que en la proposición 1 tomemos R, T de tal manera que $R(p_i) = T(p_j) = [1 : 0 : 0]$ y entonces $S = T^{-1} \circ R$ es el automorfismo que necesitamos. □

4.2. La familia de grado 4.

Como ya habíamos mencionado, la familia de grado 4 deja invariantes a todas las rectas de \mathcal{C} . Usando la invarianza de las rectas $\{x = 1\}, \{x = j\}, \{x = j^2\}, \{y = 1\}, \{y = j\}, \{y = j^2\}, \{y = x\}, \{y = jx\}, \{y = j^2x\}$ obtenemos una ecuación diferencial de la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (x^3 - 1)(a_0 + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2) \\ \dot{y} &= (y^3 - 1)(b_0 + b_{10}x + b_{01}y + b_{20}x^2 + b_{11}xy + b_{02}y^2). \end{aligned}$$

Como el origen es punto singular, $a_0 = b_0 = 0$. Y como la foliación es de grado cuatro, las partes homogéneas de grado cinco de \dot{x} y la de \dot{y} son de la forma $xg(x, y)$ y $yg(x, y)$ respectivamente. Así:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \cdots + a_{20}x^5 + a_{11}x^4y + a_{02}x^5y^2 = \cdots + x(a_{20}x^4 + a_{11}x^3y + a_{02}x^2y^2) \\ \dot{y} &= \cdots + b_{20}x^2y^3 + b_{11}xy^4 + b_{02}y^5 = \cdots + y(b_{20}x^2y^2 + b_{11}xy^3 + b_{02}y^4). \end{aligned}$$

Por lo tanto, $a_{20} = a_{11} = b_{11} = b_{02} = 0$ y $a_{02} = b_{20} = b$. Usando lo anterior, nuestra ecuación adquiere la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (x^3 - 1)(a_{10}x + a_{01}y + by^2) \\ \dot{y} &= (y^3 - 1)(b_{10}x + b_{01}y + bx^2). \end{aligned}$$

Ahora usaremos la invarianza de las tres rectas restantes.

Si $y = x$:

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{dy}{dx} = \frac{b_{10}x + b_{01}x + bx^2}{a_{10}x + a_{01}x + bx^2} \\ \Rightarrow (a_{10} + a_{01})x &= (b_{10} + b_{01})x \\ \Rightarrow a_{10} + a_{01} &= b_{10} + b_{01}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

De manera análoga, en $y = jx$:

$$\begin{aligned} j &= \frac{dy}{dx} = \frac{(b_{10} + b_{01}j)x + bx^2}{(a_{10} + a_{01}j)x + bj^2x^2} \\ \Rightarrow a_{10}j + a_{01}j^2 &= b_{10} + b_{01}j. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Por último, al evaluar en $y = j^2x$ obtenemos:

$$a_{10}j^2 + a_{01}j = b_{10} + b_{01}j^2. \quad (4.4)$$

Sumando (4.2), (4.3), (4.4) y recordando que $1 + j + j^2 = 0$:

$$\begin{aligned} (1 + j + j^2)(a_{10} + a_{01}) &= 3b_{10} + (1 + j + j^2)b_{01} \\ \Rightarrow b_{10} &= 0. \end{aligned}$$

Y sustituyendo en (4.2), $b_{01} = a_{10} + a_{01}$, e insertando esto en (4.3):

$$\begin{aligned} a_{10}j + a_{01}j^2 &= (a_{10} + a_{01})j \\ \Rightarrow a_{01}j^2 &= a_{01}j \\ \Rightarrow a_{01} &= 0. \end{aligned}$$

Y de (4.2) nuevamente:

$$a_{10} = b_{01} = a.$$

Usando todo lo anterior la ecuación se ve como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (x^3 - 1)(ax + by^2) \\ \dot{y} &= (y^3 - 1)(ay + bx^2). \end{aligned}$$

Y al dividir por a y hacer $\alpha = -\frac{b}{a}$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (x^3 - 1)(x - \alpha y^2) \\ \dot{y} &= (y^3 - 1)(y - \alpha x^2). \end{aligned} \quad (4.5)$$

O sí $a = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (x^3 - 1)y^2 \\ \dot{y} &= (y^3 - 1)x^2. \end{aligned} \quad (4.6)$$

A la foliación generada por la ecuación (4.5) la denotaremos por \mathcal{F}_α y a la que es generada por (4.6) la denotaremos \mathcal{F}_∞ .

Terminaremos esta sección con un lema que nos facilitará muchos cálculos en el futuro:

Lema 4.2.1. *Sea S un automorfismo de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ tal que $S(\mathcal{C}) = \mathcal{C}$. Entonces $S^*(\mathcal{F}_\alpha) = \mathcal{F}_\beta$ para alguna $\beta \in \overline{\mathbb{C}}$.*

Demostración. Como el grado de la foliación no depende de la carta, $S^*(\mathcal{F}_\alpha)$ también es una foliación de grado cuatro que deja invariantes a las nueve rectas de la configuración y por lo tanto se puede escribir como aquella generada por los campos vectoriales (4.5) ó (4.6). \square

4.3. Los puntos singulares de \mathcal{F}_α .

En esta sección estudiaremos los puntos de singulares \mathcal{F}_α . Por la construcción, cada ecuación de la familia es de grado cuatro y por lo tanto tiene 21 puntos singulares contando multiplicidades. Veremos que si $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$ entonces los 21 puntos son distintos y entonces son no degenerados mientras que si $\alpha \in \{1, j, j^2, \infty\}$ sólo los 12 puntos de \mathcal{P} son puntos singulares, de los cuales, 9 son no degenerados y los tres restantes están en uno de los subconjuntos \mathcal{P}_i del lema 1.

Primero, observemos que los 12 puntos de \mathcal{P} son puntos singulares de \mathcal{F}_α , ya que por cada uno de ellos pasan 3 rectas invariantes de la foliación. Como cada recta de \mathcal{L} tiene 4 puntos de \mathcal{P} , cada recta tiene al menos 4 puntos singulares, y como la foliación es de grado cuatro, cada recta invariante tiene, contando multiplicidades, 5 puntos singulares.

	$(1, \alpha)$	$(j, \alpha j^2)$	$(j^2, \alpha j)$	
$y = j^2$	$(1, j^2)$	(j, j^2)	(j^2, j^2)	$(\alpha j, j^2)$
$y = j$	$(1, j)$	(j, j)	(j^2, j)	$(\alpha j^2, j)$
$y = 1$	$(1, 1)$	$(j, 1)$	$(j^2, 1)$	$(\alpha, 1)$
	$x = 1$	$x = j$	$x = j^2$	

Cuadro 4.1: Algunos puntos singulares de \mathcal{F}_α .

La tabla anterior muestra 4 puntos singulares de 6 rectas de la configuración. En las rectas $y = \text{cte}$, el quinto punto singular es $[1 : 0 : 0]$ y en las que $x = \text{cte}$, el quinto punto es $[0 : 1 : 0]$. En total, llevamos 17 puntos singulares.

En las tres rectas restantes, el quinto punto singular es $(\frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\alpha}) \in \{y = x\}$, $(\frac{j}{\alpha}, \frac{j^2}{\alpha}) \in \{y = jx\}$ y $(\frac{j^2}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}) \in \{y = j^2x\}$. Si a estos 20 puntos le añadimos el origen, que también es punto singular, tenemos los 21 puntos singulares de \mathcal{F}_α .

Los 21 puntos singulares en el caso $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$.

Observemos que si $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$, los 21 puntos singulares son distintos y por lo tanto no degenerados. Así, la parte lineal del campo vectorial en estos puntos tiene dos valores propios (λ_1, λ_1) distintos de cero. Como veremos a continuación, en este caso, los 21 puntos

singulares son linealizables. Analizaremos primero los 12 puntos de la configuración y luego los 9 puntos singulares restantes.

Por cada punto de \mathcal{P} pasan tres rectas invariantes de \mathcal{F}_α , entonces, en estos puntos tenemos que $\lambda_1 = \lambda_2$. Por lo tanto, en estos puntos singulares no hay resonancias (ver sección 2.5) y los valores propios están en el dominio de Poincaré. Entonces, por el teorema de linealización de Poincaré, la ecuación es linealizable en una vecindad de cada uno de estos doce puntos. Lo anterior quiere decir que en una vecindad del punto singular y utilizando coordenadas adecuadas, la ecuación se lee como $\lambda(u\frac{\partial}{\partial u} + v\frac{\partial}{\partial v})$ y entonces, $\frac{v}{u}$ es una primera integral meromorfa de la ecuación en una vecindad de cada punto de \mathcal{P} .

Denotemos por $q_i(\alpha)$ $i = 1, \dots, 9$ a los otros nueve puntos singulares. La parte lineal del campo que representa a \mathcal{F}_α en el punto singular $q_1(\alpha) := (1, \alpha)$ es:

$$\begin{pmatrix} 3(1 - \alpha^3) & 0 \\ -2\alpha(\alpha^3 - 1) & \alpha^3 - 1 \end{pmatrix}$$

Así, en este punto, $\lambda_1 = -3\lambda_2$. Haciendo un cálculo similar, podemos ver que en los otros ocho puntos singulares los valores propios de la parte lineal cumplen esta misma relación, pero también podemos usar una transformación proyectiva que lleve la recta de la configuración donde se encuentra el punto singular en cuestión a la recta $x = 1$ y que además fije a la configuración ya que el lema 4.2.1 nos asegura que la nueva foliación también pertenece a la familia de grado cuatro.

Por ejemplo, si $q_i(\alpha)$ está en la recta $\{x = j\}$ ó $\{x = j^2\}$ las transformaciones proyectivas $(x, y) \rightarrow (j^2x, y)$ y $(x, y) \rightarrow (jx, y)$ respectivamente cumplen lo deseado. Si $q_i(\alpha)$ está en una recta de la configuración que pasa por $(0, 0)$, a las transformaciones anteriores les antepone una transformación como las del corolario 2, que intercambie $(0, 0)$ con $[0 : 1 : 0]$ y fije a la configuración (cualquier transformación que intercambie $(0, 0)$ con $[0 : 1 : 0]$ lleva las rectas por el origen en rectas $\{y = cte\}$), y si $q_i(\alpha)$ está en una recta de la configuración $\{y = cte\}$, hacemos lo mismo pero ahora intercambiando a los puntos $[1 : 0 : 0]$ y $[0 : 1 : 0]$.

Como los valores propios en cada uno de estos nueve puntos cumplen $\lambda_1 = -3\lambda_2$, los valores propios están en el dominio de Siegel y por ende, no podemos usar el teorema de linealización de Poincaré. Sin embargo, la ecuación también es linealizable en una vecindad de estos puntos. Para ver esto primero haremos unas definiciones que utilizaremos a lo largo de este capítulo:

Notación 1.

1. Llamemos M a la variedad que obtenemos de explotar y resolver los 12 puntos singulares de \mathcal{P} y denotemos por $\Pi: M \rightarrow \mathbb{C}\mathbb{P}^2$ al mapeo que resuelve las singularidades.
2. $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ será la foliación en M inducida por \mathcal{F}_α , *i.e.* $\Pi^*(\mathcal{F}_\alpha) = \tilde{\mathcal{F}}_\alpha$.
3. D_i va a ser el divisor asociado a $p_i \in \mathcal{P}$ $i = 1, \dots, 12$. $D_i = \Pi^{-1}(p_i)$.

4. Para cada $l_i \in \mathcal{L}$ denotaremos por $\tilde{l}_i = \overline{\Pi^{-1}(l_i \setminus \{p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}\})}$, donde p_{ik} $k = 1, \dots, 4$ son los cuatro puntos de \mathcal{P} que están en l_i .

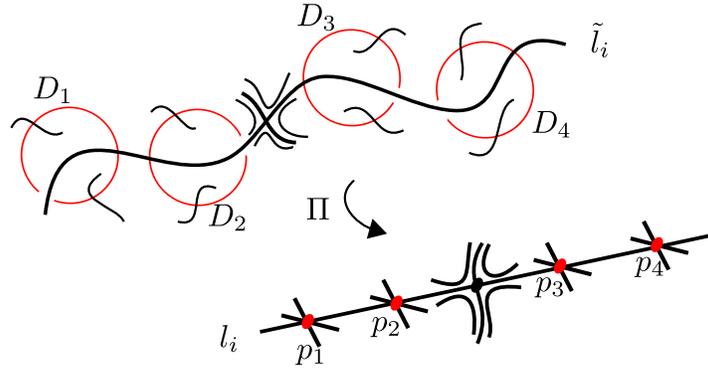


Figura 4.2: Explosión de los cuatro puntos singulares en una recta invariante de la foliación \mathcal{F}_α . Las tres hojas que pasan por cada divisor D_i se corresponden con las tres rectas invariantes por cada punto p_i que explota Π .

Ahora sí, como los 12 puntos singulares de \mathcal{P} son radiales, al explotar no obtenemos nuevos puntos singulares en los divisores, así, $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ sólo tiene un punto singular en \tilde{l}_i , a saber $\Pi^{-1}(q_i(\alpha)) := \tilde{q}_i(\alpha)$. Por lo tanto, $\tilde{l}_i \setminus \tilde{q}_i(\alpha)$, es una hoja de $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ que es biholomorfa a \mathbb{C} y entonces la holonomía de esta hoja es la identidad y por un teorema de Mattei-Moussu¹ ver [6, teorema 2 p. 482] $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ es linealizable en una vecindad de $q_i(\alpha)$.

Como Π es un biholomorfismo en una vecindad de $q_i(\alpha)$, \mathcal{F}_α también es linealizable en una vecindad de este punto y en coordenadas adecuadas se ve como $3u \frac{\partial}{\partial u} - v \frac{\partial}{\partial v}$ y por lo tanto, v^3u es una primera integral en una vecindad de $q_i(\alpha)$.

Podemos resumir todo lo anterior en la siguiente proposición:

Proposición 4.3.1. *Si $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$ entonces los 21 puntos singulares de \mathcal{F}_α son no degenerados. Los 12 puntos de \mathcal{P} son radiales con primera integral meromorfa local $\frac{v}{u} = cte$. Los otros 9 puntos singulares son de tipo silla y tienen una primera integral holomorfa local de la forma $v^3u = cte$.*

Los 21 puntos singulares en el caso $\alpha \in \{1, j, j^2, \infty\}$.

Cuando $\alpha \in \{1, j, j^2, \infty\}$ los 9 puntos singulares que no están en \mathcal{P} degeneran en 3 puntos.

Para $\alpha = 1$:

$$(1, \alpha), (\alpha, 1), \left(\frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\alpha}\right) \rightarrow (1, 1).$$

$$(j, \alpha j^2), (\alpha j, j^2), \left(\frac{j}{\alpha}, \frac{j^2}{\alpha}\right) \rightarrow (j, j^2).$$

¹Sea X un campo vectorial con dos valores propios $\lambda_1, \lambda_2 \neq 0$ tales que $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \notin \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}^+$. Entonces X es linealizable si y sólo si el grupo de holonomía de una hoja de la foliación determinada por el campo vectorial X es linealizable.

$$(j^2, \alpha j), (\alpha j^2, j), \left(\frac{j^2}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}\right) \rightarrow (j^2, j).$$

Para $\alpha = j$:

$$(1, \alpha), (\alpha j^2, j), \left(\frac{j}{\alpha}, \frac{j^2}{\alpha}\right) \rightarrow (1, j).$$

$$(\alpha, 1), (j, \alpha j^2), \left(\frac{j^2}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}\right) \rightarrow (j, 1).$$

$$(\alpha j, j^2), (j^2, \alpha j), \left(\frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\alpha}\right) \rightarrow (j^2, j).$$

Para $\alpha = j^2$:

$$(1, \alpha), (\alpha j, j^2), \left(\frac{j^2}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}\right) \rightarrow (1, j^2).$$

$$(\alpha j^2, j), (j, \alpha j^2), \left(\frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\alpha}\right) \rightarrow (j, j).$$

$$(\alpha, 1), (j^2, \alpha j), \left(\frac{j}{\alpha}, \frac{j^2}{\alpha}\right) \rightarrow (j^2, j).$$

Para $\alpha = \infty$:

$$(1, \alpha), (j, \alpha j^2), (j^2, \alpha j) \rightarrow [0 : 1 : 0].$$

$$(\alpha, 1), (\alpha j^2, j), (\alpha j, j^2) \rightarrow [1 : 0 : 0].$$

$$\left(\frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\alpha}\right), \left(\frac{j}{\alpha}, \frac{j^2}{\alpha}\right), \left(\frac{j^2}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}\right) \rightarrow (0, 0).$$

Por lo tanto, si $\alpha \in \{1, j, j^2, \infty\}$, \mathcal{F}_α tiene 12 puntos singulares, a saber, los 12 puntos de \mathcal{P} . Y el análogo a la proposición 4.3.1 es la siguiente proposición:

Proposición 4.3.2. *Si $\alpha \in \{1, j, j^2, \infty\}$ las singularidades de la foliación \mathcal{F}_α son los 12 puntos de \mathcal{P} , 9 de ellos son de tipo radial y los otros 3 están contenidos en alguno de los conjuntos \mathcal{P}_i de la proposición 1. Además, la foliación tiene una primera integral racional $H_\alpha = \frac{P_\alpha}{Q_\alpha}$ donde P_α y Q_α son producto de 3 líneas de \mathcal{L} . Estas líneas las podemos escoger de la siguiente manera, si $p_1, p_2, p_3 \in \mathcal{P}_i$ son las singularidades de \mathcal{F}_α que no son de tipo radial, sean l_1, l_2, l_3 , las rectas de \mathcal{L} que pasan por alguno de estos 3 puntos y l_4, l_5, l_6 , rectas de \mathcal{L} que pasan por algún otro de esos 3 puntos, entonces $H_\alpha = \frac{l_1 l_2 l_3}{l_4 l_5 l_6}$.*

Demostración. La única parte de la proposición que falta demostrar es que \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional. Primero observemos que si S es una transformación proyectiva como las del corolario 4.1.1, por el lema 4.2.1, $S^*(\mathcal{F}_\alpha) = \mathcal{F}_\beta$ y además $\beta \in \{1, j, j^2, \infty\}$ pues en caso contrario $S^*(\mathcal{F}_\alpha)$ tendría 21 puntos singulares mientras que \mathcal{F}_α tiene solamente 12 puntos singulares.

Por la observación anterior, basta encontrar una primera integral para \mathcal{F}_∞ y después jalar esta integral a las demás foliaciones.

Sea $H_\infty = \frac{y^3-1}{x^3-1} = \frac{(y-1)(y-j)(y-j^2)}{(x-1)(x-j)(x-j^2)} = \frac{P}{Q}$. Entonces, $\frac{dH_\infty}{H_\infty} = \frac{dP}{P} - \frac{dQ}{Q} = \frac{3y^2 dy}{y^3-1} - \frac{3x^2 dx}{x^3-1} = \frac{3}{(y^3-1)(x^3-1)} [(x^3-1)y^2 dy - (y^3-1)x^2 dx]$. Por lo tanto, H_∞ es una primera integral de \mathcal{F}_∞ y así, $H_\infty - 1$ y $\frac{1}{H_\infty} - 1$ también son primeras integrales de \mathcal{F}_∞ :

$$H_\infty = \frac{(y-1)(y-j)(y-j^2)}{(x-1)(x-j)(x-j^2)}$$

$$H_\infty - 1 = \frac{(y-x)(y-jx)(y-j^2x)}{(x-1)(x-j)(x-j^2)}$$

$$\frac{1}{H_\infty} - 1 = \frac{(y-x)(y-jx)(y-j^2x)}{(y-1)(y-j)(y-j^2)}$$

En la primera de las integrales los puntos que se escogieron son $[1 : 0 : 0]$ y $[0 : 1 : 0]$, en la segunda se escogieron $(0, 0)$ y $[0 : 1 : 0]$ y en la última $(0, 0)$ y $[1 : 0 : 0]$. \square

Con la proposición 4.3.1 podemos probar que la familia de grado cuatro cumple el primer inciso del teorema principal .

En efecto, el conjunto A que le quitaremos a $\overline{\mathbb{C}}$ para que la familia tenga singularidades no degeneradas de tipo analítico fijo es $A = \{1, j, j^2, \infty\}$. La tabla 4.1 muestra que las singularidades de \mathcal{F}_α se pueden escribir como funciones holomorfas $p_j : \overline{\mathbb{C}} \setminus A \rightarrow \mathbb{CP}^2$ y las primeras integrales que se obtuvieron en la proposición 4.3.1 muestran que los puntos singulares $p_j(s), p_j(t)$ son localmente analíticamente equivalentes.

4.4. La transversalidad de las distintas foliaciones.

La siguiente proposición nos brinda información de cómo se intersecan hojas de distintas foliaciones de M que son inducidas por $(\mathcal{F}_\alpha)_{\alpha \in \overline{\mathbb{C}}}$ y $\Pi : M \rightarrow \mathbb{CP}^2$, pero antes, recordemos parte de la notación que se usó antes de la proposición 4.3.1.

1. Llamemos M a la variedad que obtenemos de explotar y resolver los 12 puntos singulares de \mathcal{P} y denotemos por $\Pi : M \rightarrow \mathbb{CP}^2$ al mapeo que resuelve las singularidades.
2. $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ será la foliación en M inducida por \mathcal{F}_α , i.e. $\Pi^*(\mathcal{F}_\alpha) = \tilde{\mathcal{F}}_\alpha$.
3. D_i va a ser el divisor asociado a $p_i \in \mathcal{P}$ $i = 1, \dots, 12$. $D_i = \Pi^{-1}(p_i)$.
4. Para cada $l_j \in \mathcal{L}$, en el conjunto de las nueve rectas que deja invariante toda foliación de la familia, denotaremos por \tilde{l}_i al transformado estricto bajo Π de la recta l_i . Es decir, $\tilde{l}_i = \overline{\Pi^{-1}(l_i \setminus \{p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}\})}$, donde p_{ik} $k = 1, \dots, 4$ son los cuatro puntos de \mathcal{P} que están en l_i .

Proposición 4.4.1. *Si $\alpha \neq \beta$ entonces las foliaciones $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ y $\tilde{\mathcal{F}}_\beta$ se intersecan transversalmente afuera del conjunto $\tilde{\mathcal{L}} = \tilde{l}_1 \cup \dots \cup \tilde{l}_9$.*

Demostración. Para demostrar la proposición vamos a usar las expresiones (4.5) y (4.6) para mostrar la transversalidad en aquellos lugares donde la transformación $\Pi: M \rightarrow \mathbb{CP}^2$ lo permita. En los lugares donde no podamos hacer esto (los divisores que obtenemos al explotar los doce puntos) vamos a usar las cartas de la explosión para mostrar que las foliaciones se cortan de manera transversal. Supongamos que $\alpha, \beta \neq \infty$, primero probaremos que las foliaciones $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha, \tilde{\mathcal{F}}_\beta$ son transversales afuera del conjunto $\tilde{\mathcal{L}} \cup D_1 \cup \dots \cup D_{12}$. Como Π es un biholomorfismo fuera de $D_1 \cup \dots \cup D_{12}$, basta demostrar que $\mathcal{F}_\alpha, \mathcal{F}_\beta$ son transversales afuera del conjunto $l_1 \cup \dots \cup l_9$. Si usamos los campos vectoriales que generan a las foliaciones y calculamos su determinante obtenemos:

$$P_\alpha Q_\beta - P_\beta Q_\alpha = (\beta - \alpha)(x^3 - 1)(y^3 - 1)(y^3 - x^3).$$

Todavía nos hace falta probar que son transversales en la recta al infinito. Usando el corolario 4.1.1 podemos encontrar un automorfismo S de \mathbb{CP}^2 que mande a los puntos $[1 : 0 : 0], [0 : 1 : 0]$ a otros dos puntos de \mathcal{P} pero que estén en la parte finita y por lo tanto la recta al infinito ahora está en la parte finita. Como las transformaciones que fijan a la configuración cumplen $S^*(\mathcal{F}_\alpha) = \mathcal{F}_\gamma$, el cálculo anterior muestra que las foliaciones también son transversales en la recta al infinito.

Resta ver que $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha, \tilde{\mathcal{F}}_\beta$ también son transversales en $D_1 \cup \dots \cup D_{12} \setminus \tilde{\mathcal{L}}$. Como por cada punto $p_i \in \mathcal{P}$ tenemos un divisor D_i , si usamos el corolario 4.1.2 sólo tenemos que ver que $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha, \tilde{\mathcal{F}}_\beta$ son transversales en uno de los doce divisores, usemos $D_1 = \Pi^{-1}(p_1 = (0, 0))$. Si explotamos el origen usando la carta (u, x) en la cual $\Pi(u, x) = (x, ux)$, las tres rectas de \mathcal{L} que pasan por el origen ($y = x, y = jx, y = j^2x$) se transforman en las rectas $u = 1, u = j, u = j^2$, el divisor D_1 queda descrito por $x = 0$ y el campo vectorial que genera a $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ en esta carta es:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \alpha(u^3 - 1) + xh_1(u, x) \\ \dot{x} &= 1 + xh_2(u, x). \end{aligned}$$

donde h_1 y h_2 son polinomios. Por lo tanto en el divisor D_1 las pendientes de $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha, \tilde{\mathcal{F}}_\beta$ son $\frac{du}{dx} = \alpha(u^3 - 1)$ y $\frac{du}{dx} = \beta(u^3 - 1)$ respectivamente; esto quiere decir que las foliaciones son transversales en $D_1 \setminus \tilde{\mathcal{L}}$ (si usamos la otra carta, en la cual $\Pi(y, v) = (vy, y)$, obtenemos un resultado análogo).

Cuando $\beta = \infty$ procedemos de manera análoga, en los lugares donde Π es un biholomorfismo tenemos:

$$P_\alpha Q_\infty - P_\infty Q_\alpha = (x^3 - 1)(y^3 - 1)(x^3 - y^3),$$

este determinante sólo se anula en las nueve rectas que dejan invariantes ambas foliaciones y por lo tanto las foliaciones son transversales fuera de los 12 divisores y las nueve rectas invariantes. Al explotar el punto $(0, 0)$ y usar la misma carta (u, x) que antes, la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\infty$ esta generada por el campo vectorial,

$$\begin{aligned} \dot{u} &= u^3 - 1 \\ \dot{x} &= -(x^3 - 1)u^2x. \end{aligned}$$

Esta última expresión muestra que el punto $(0, 0)$ es un punto no dicrítico pues el divisor D_1 es invariante para la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\infty$ mientras que para la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, el punto $(0, 0)$ es dicrítico y por lo tanto las foliaciones son transversales. \square

La foliación \mathcal{F}_∞ tiene por primera integral a $H_\infty = \frac{y^3-1}{x^3-1}$ (proposición 4.3.2), si usamos coordenadas homogéneas, las hojas de la foliación quedan descritas por $L_c = \{y^3 - z^3 - c(x^3 - z^3) = 0\}$. Para $c = 0$, $L_c = \{(y - z)(y - jz)(y - j^2z) = 0\}$ y entonces el punto $[1 : 0 : 0]$ es un punto singular. Si $c = \infty$, $L_c = \{(x - z)(x - jz)(x - j^2z) = 0\}$ y así, $[0 : 1 : 0]$ es un punto singular. Para $c = 1$, $L_c = \{(y - x)(y - jx)(y - j^2x) = 0\}$ y entonces $[0 : 1 : 0]$ es otro punto singular. Para todas las demás $c \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$, de acuerdo al ejemplo A.2.1 la hoja L_c es topológicamente equivalente a un toro.

Observemos que los doce puntos singulares radiales están contenidos en las curvas de nivel singulares de H_∞ , por lo tanto, si consideramos la función $h = H_\infty \circ \Pi: M \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$ y tomamos un valor regular $c \in \overline{\mathbb{C}} \setminus (0, 1, \infty)$ de la función H_∞ , entonces $h^{-1}(c)$ es topológicamente equivalente a un toro.

Observación 4.4.1. El conjunto $h^{-1}(1)$ está formado por el divisor D_1 que resulta de explotar el punto $(0, 0)$ y el transformado estricto bajo Π de las rectas $\{(y - x)(y - jx)(y - j^2x) = 0\}$. En efecto, $H_\infty^{-1}(1) = \{(y - x)(y - jx)(y - j^2x) = 0\}$ y como se vio al final de la proposición 4.4.1 el divisor D_1 es invariante para la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\infty$ y este divisor se proyecta bajo Π al punto $(0, 0) \in H_\infty^{-1}(1)$. Los otros puntos singulares que explota la transformación Π y que están en las rectas $\{(y - x)(y - jx)(y - j^2x) = 0\}$ son puntos singulares radiales (ver proposición 4.3.2) y por lo tanto al explotar estos puntos, las hojas de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\infty$ cortan de manera transversal a los divisores correspondientes y así, los divisores asociados a estos puntos singulares no están contenidos en $h^{-1}(1)$. De manera análoga $h^{-1}(0)$ y $h^{-1}(\infty)$, (cada uno de ellos) está formado por otro divisor junto con el transformado estricto de otras tres rectas que deja invariante cualquier foliación de la familia. Es decir, $h^{-1}(0, 1, \infty) = D_1 \cup D_2 \cup D_3 \cup_{i=1}^9 \tilde{l}_i$, donde D_1, D_2, D_3 son los divisores que se obtienen al explotar los puntos (en coordenadas homogéneas) $[0 : 0 : 1][0 : 1 : 0][1 : 0 : 0]$ respectivamente y \tilde{l}_i es el transformado estricto de alguna de las nueve rectas que deja invariante cualquier foliación \mathcal{F}_α de la familia.

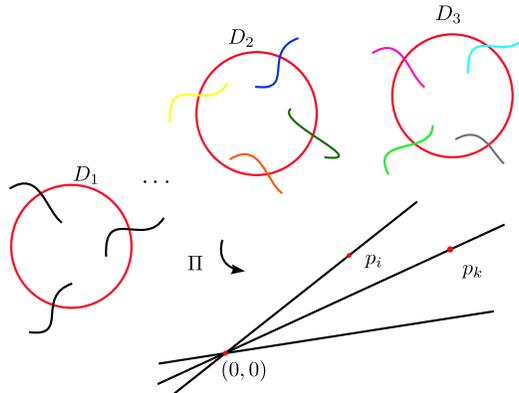


Figura 4.3: Los divisores en la explosión de la foliación \mathcal{F}_∞ .

Si $V = M \setminus h^{-1}(0, 1, \infty)$ y $\Omega = \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$ entonces $h: V \rightarrow \Omega$ satisface las hipótesis del lema 2.3.1 y por lo tanto, (V, h, Ω) es un haz topológico con fibra T isomorfa a un toro. Como $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ es transversal a $\tilde{\mathcal{F}}_\infty$, si fijamos una fibra no singular $T_a = h^{-1}(a)$ obtenemos el grupo de holonomía global G_α de T_α asociado a la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ y al haz fibrado (V, h, Ω) (ver sección 2.3). Como el grupo fundamental de $\Omega = \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$ está generado por dos lazos γ_1 y γ_2 , el grupo de holonomía global G_α está generado por dos elementos f_α y g_α . Antes de continuar veamos quién es la fibra de este haz topológico.

Proposición 4.4.2. *Sea (V, h, Ω) el haz topológico de arriba, si $\Gamma = \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}$ entonces, $h^{-1}(a) \simeq \mathbb{C}/\Gamma$.*

Demostración. Si fijamos una foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, como el grupo fundamental de Ω está generado por dos elementos γ_1, γ_2 , entonces el grupo de holonomía G_α está generado por dos biholomorfismos $f_\alpha, g_\alpha: T_a \rightarrow T_a$. La foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ sólo tiene nueve puntos singulares y de manera local, alrededor de cada uno de estos puntos, la foliación está generada por el campo vectorial $3u\frac{\partial}{\partial u} - v\frac{\partial}{\partial v}$ (proposición 4.3.1). Así, la transformación de holonomía asociada a la separatriz local $\{v = 0\}$ es $v \mapsto e^{\frac{2\pi i}{3}}v = jv$ y tiene orden tres. Si tomamos a T_a como una transversal a la separatriz local $\{v = 0\}$, entonces $f_\alpha^3 = g_\alpha^3 = Id$ y tanto f_α como g_α fijan un punto. Un toro que tenga un automorfismo con las propiedades anteriores es biholomorfo a \mathbb{C}/Γ donde $\Gamma = \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}$ (ver apéndice B). \square

4.5. El grupo de holonomía global de $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$.

Para probar que una foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional vamos a usar algunas propiedades del grupo de holonomía global que se construyó en la sección anterior. En esta sección probaremos algunas propiedades de este grupo.

Lema 4.5.1. *Sea G_α el grupo de holonomía global asociado al haz fibrado (V, h, Ω) y la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$. Entonces en una carta adecuada de \mathbb{C} , G_α está generado por $f_\alpha(z) = jz$ y $g_\alpha(z) = jz + A(\alpha)$.*

Demostración. Si fijamos coordenadas de una cubierta universal $P: \mathbb{C} \rightarrow T_a$ entonces en esta cubierta, $f_\alpha(z) = jz + a(\alpha)$ y $g_\alpha(z) = jz + b(\alpha)$ (ver apéndice B). Notemos que $z_0(\alpha) := \frac{a(\alpha)}{1-j}$ es un punto fijo de f_α , por lo tanto, si $k_\alpha(z) = z + z_0(\alpha)$ entonces $k_\alpha^{-1} \circ f_\alpha \circ k_\alpha(z) = jz$. En estas nuevas coordenadas, $k_\alpha^{-1} \circ g_\alpha \circ k_\alpha(z) = jz + b(\alpha) - a(\alpha) = jz + A(\alpha)$. \square

A continuación veremos cómo se ve un subgrupo de biholomorfismos de \mathbb{C}/Γ generado por dos elementos $f(z) = jz$ y $g(z) = jz + A$.

Proposición 4.5.1. *Sea G un subgrupo de biholomorfismos de \mathbb{C}/Γ generado por $f(z) = jz$ y $g(z) = jz + A$, entonces $G = \{j^i z + A; i \in \{0, 1, 2\}, d \in \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}\}$.*

Demostración. Si $G_1 = \{j^i z + A; i \in \{0, 1, 2\}, d \in \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}\}$, es claro que $G \subset G_1$. Para demostrar que $G_1 \subset G$ basta ver que $z + A$ y $z + jA$ están en G pues en este caso, si $d = m + jn$ tenemos que $\mu(z) = z + dA = z + (m + nj)A = z + mA + njA \in G$ y si a μ le antepone f y f^2 obtenemos las transformaciones $gz + dA$ y $f^2gz + dA$ respectivamente. Así pues, $g \circ f^2 = j(j^2z) + A = z + A$ y $f \circ g \circ f = j(j^2z + A) = z + jA$. \square

Las siguientes equivalencias nos van a ayudar a probar la existencia de primeras integrales racionales.

Corolario 4.5.1. *Sea G un grupo como el de la proposición anterior, entonces son equivalentes:*

1. G es finito.
2. G tiene órbita finita en \mathbb{C}/Γ .
3. Existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $nA \in \Gamma$.

Demostración. 1 \Rightarrow 2. Es claro.

2 \Rightarrow 3 Sea $\mu(z) = z + A$, fijemos $z_0 \in \mathbb{C}/\Gamma$ y consideremos al conjunto $\{z_0, \mu(z_0), \mu^2(z_0), \dots\}$. Como la órbita de z_0 es finita tienen que existir $m, n \in \mathbb{N}$, $m < n$ tales que $\mu^m(z_0) = \mu^n(z_0)$ (mod Γ). Esto quiere decir que $mA = nA$ (mod Γ) y por lo tanto $(n - m)A \in \Gamma$.

3 \Rightarrow 1. Para probar este último inciso y para uso posterior, vamos a calcular explícitamente el número de elementos de G . Sea $k \in \mathbb{N}$ el natural más pequeño que satisface $kA \in \Gamma$ y $\mu(z) = j^i z + dA \in G$, encontraremos una manera equivalente de escribir a μ . Si $d = (p + jq)$ y dividimos a p y q entre k obtenemos $p = ka + \tilde{p}$ y $q = kb + \tilde{q}$ con $0 \leq \tilde{p}, \tilde{q} < k$ y entonces podemos escribir a μ como $\mu(z) = j^i + k(a + jb)A + (\tilde{p} + j\tilde{q})A$; módulo Γ , $k(a + jb)A = 0$, puesto que $kA \in \Gamma$ por lo tanto, $\mu(z)$ induce la misma transformación que $\tilde{\mu}(z) = j^i z + (\tilde{p} + j\tilde{q})A$ y además $0 \leq \tilde{p}, \tilde{q} < k$. Lo anterior quiere decir que toda transformación $\mu(z) = j^i z + dA$ la podemos escribir con una $d = m + jn$ tal que $0 \leq m, n < k$. Con esto no es difícil convencerse de que G tiene $3k^2$ elementos. \square

Si \tilde{L} es una hoja de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, $\alpha \neq \infty$, la construcción del grupo de holonomía global (ver sección 2.3) nos asegura que la función $h: \tilde{L} \setminus h^{-1}(0, 1, \infty) \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$ es una aplicación cubriente. Para ver bajo qué condiciones la hoja $L = \Pi(\tilde{L})$ es algebraica, vamos a necesitar una expresión local de la función $h: \tilde{L} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$ alrededor de los puntos $p \in \tilde{L} \cap h^{-1}(0, 1, \infty)$.

Lema 4.5.2. *Sea \tilde{L} una hoja de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, $\alpha \neq \infty$ que no pasa por ninguno de los nueve puntos silla $\tilde{q}_i(\alpha)$ de la foliación, entonces, alrededor de cada punto $p \in \tilde{L} \cap h^{-1}(0, 1, \infty)$ existe una carta local z alrededor de p tal que en esta carta la función $h: \tilde{L} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$ adquiere la expresión $h(z) = 1 + z^3$.*

Demostración. Como hemos venido haciendo, basta probar la afirmación para $p \in h^{-1}(1) = D_1 \cup \tilde{l}_1 \cup \tilde{l}_2 \cup \tilde{l}_3$ (ver observación 4.4.1) y después usar el corolario 4.1.2 y el lema 4.2.1 para ver que la afirmación también es válida en cada punto del conjunto $\tilde{L} \cap h^{-1}(0, \infty)$. Como la hoja \tilde{L} no pasa por ninguno de los nueve puntos silla $\tilde{q}_i \in \tilde{l}_i$ y las rectas \tilde{l}_i son invariantes para la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, entonces $\tilde{L} \cap h^{-1}(1) \subset D_1$. Usando la carta (x, u) de M en la cual $\Pi(x, u) = (x, ux)$ tenemos que $h(x, u) = H_\infty \circ \Pi(x, u) = \frac{u^3 x^3 - 1}{x^3 - 1}$ y así, $h(x, u) - 1 = \frac{x^3(u^3 - 1)}{x^3 - 1}$. En esta carta el divisor D_1 queda descrito por $\{x = 0\}$ y como \tilde{L} interseca de manera transversal al divisor D_1 (proposición 4.4.1) podemos parametrizar a \tilde{L} alrededor de $p \in \tilde{L} \cap h^{-1}(1)$ con una función $x \mapsto (x, u(x))$ donde $u: (\mathbb{C}, 0) \rightarrow \mathbb{C}$ es holomorfa. Así, $h - 1: \tilde{L} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$ adquiere la expresión $h(x, u(x)) - 1 = \frac{x^3((u(x))^3 - 1)}{x^3 - 1}$ alrededor del punto p . Como $u(0) \notin \{1, j, j^2\}$ pues estos valores de u se corresponden con las intersecciones del divisor D_1 con las rectas \tilde{l}_i , concluimos que la función $h - 1: \tilde{L} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$ tiene orden tres alrededor del punto $p \in \tilde{L} \cap h^{-1}(1)$ y por lo tanto existe una carta coordenada z alrededor de $p \in \tilde{L}$ tal que, $h(z) = 1 + z^3$. \square

Proposición 4.5.2. *Sea $G_\alpha = \langle jz, jz + A(\alpha) \rangle$ el grupo de holonomía global asociado a $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, entonces son equivalentes:*

1. \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional.
2. \mathcal{F}_α tiene una hoja algebraica que no está contenida en las líneas invariantes de \mathcal{L} .
3. Existe un natural $n \in \mathbb{N}$ tal que $nA(\alpha) \in \Gamma$.

Demostración. 1 \Rightarrow 2. Es claro.

2 \Rightarrow 3 Sea L una hoja algebraica de \mathcal{F}_α que no está contenida en las líneas de \mathcal{L} . Por el teorema de Bézout tenemos que $L \cap H^{-1}(a)$ es un conjunto finito. Si \tilde{L} es el transformado estricto de L (i.e. $\tilde{L} = \overline{\Pi^{-1}(L \setminus \mathcal{P})}$ donde \mathcal{P} son los puntos que explota Π^{-1}), entonces $\tilde{L} \cap T_a$ es un conjunto finito pues $T_a = \Pi^{-1}(H^{-1}(a))$, pero $\tilde{L} \cap T_a$ es una órbita de G_α y por el corolario anterior, existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $nA(\alpha) \in \Gamma$.

3 \Rightarrow 1 Sea \tilde{L} una hoja de $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ tal que $\Pi(\tilde{L})$ no está contenida en las nueve rectas de la configuración y tampoco pasa por los nueve puntos silla $q_i(\alpha)$, veremos que podemos cubrir a \tilde{L} con una cantidad finita de abiertos relativamente compactos y por lo tanto \tilde{L} es compacta. Por el lema anterior, en cada punto $p_i \in \tilde{L} \cap h^{-1}(0, 1, \infty)$ existe una bola B_i tal que $h(B_i)$ es abierto en $\overline{\mathbb{C}}$ y como $h: \tilde{L} \setminus h^{-1}(0, 1, \infty) \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$ es una aplicación cubriente, para cada punto $x \in \tilde{L} \setminus h^{-1}(0, 1, \infty)$ existe un abierto U_x relativamente compacto tal que $h(U_x)$ es abierto en $\overline{\mathbb{C}}$. Los conjuntos $h(B_i)$ y $h(U_x)$ forman una cubierta abierta de $\overline{\mathbb{C}}$ así que podemos extraer una subcubierta finita $\{V_i\}$ (donde $V_i = h(U_x)$ ó $V_i = h(B_k)$). Por hipótesis G_α tiene órbita finita en \mathbb{C}/Γ así que existe un $m \in \mathbb{N}$ tal que $\#\tilde{L} \cap h^{-1}(b) \leq m$ para toda $b \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1, \infty\}$ (ver observación 2.3.1). Por continuidad lo mismo sucede con las intersecciones de $h^{-1}(0)$, $h^{-1}(1)$ y $h^{-1}(\infty)$ con \tilde{L} . Así, para un conjunto abierto V_i , $V_i = h(U_x)$, $h^{-1}(V_i)$ está formado por un número finito de abiertos relativamente compactos y por lo tanto $h^{-1}(V_i)$ también es relativamente compacto. Los conjuntos $h^{-1}(V_i)$ junto con las bolas B_i que son un número finito, forman una cubierta finita de \tilde{L} por abiertos relativamente compactos. Como la hoja \tilde{L} no pasa por puntos singulares es una superficie de Riemann compacta y por lo tanto algebraica (ver [5, teorema 1.9 pp. 171]) y por lo tanto la hoja $L = \Pi(\tilde{L})$ de la foliación \mathcal{F}_α es algebraica. Como la foliación \mathcal{F}_α tiene un infinidad de hojas algebraicas, tiene una primera integral racional (teorema 3.3.2). \square

4.6. El grado de la primera integral de \mathcal{F}_α .

En esta sección veremos que existe un subconjunto denso E de parámetros $\alpha \in \overline{\mathbb{C}}$ tal que si $\alpha \in E$, entonces la foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional. En caso de que dicha primera integral exista sabemos que el grupo de holonomía global G_α de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha = \Pi^*(\mathcal{F}_\alpha)$ es finito (proposición 4.5.2 y corolario 4.5.1). Vamos a acotar por abajo el grado de la primera integral en términos de la cardinalidad del grupo de holonomía global y mostraremos que para una natural k_0 fijo, los parámetros $\alpha \in E$ tales que la primera integral de la foliación \mathcal{F}_α es de grado menor que k_0 , forman un subconjunto finito.

Por la proposición 4.5.2 sabemos que la foliación \mathcal{F}_α tiene primera integral racional si y sólo si existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $nA(\alpha) \in \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z} = \Gamma$, donde $g_\alpha(z) = jz + A(\alpha)$ es uno de los dos generadores del grupo de holonomía global G_α . La condición $nA(\alpha) \in \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}$ es equivalente a que $A(\alpha) \in \mathbb{Q} \oplus j\mathbb{Q}$. El conjunto $A(\alpha) \in \mathbb{Q} \oplus j\mathbb{Q}$ es un subconjunto denso del toro \mathbb{C}/Γ . Veremos que la función $A: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$ es holomorfa, no constante y por lo tanto localmente abierta. Esto implica que la preimagen de $\mathbb{Q} \oplus j\mathbb{Q}$ bajo A , es densa en \mathbb{C} . Así pues, vamos a estudiar algunas propiedades de la función $A: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$.

Primero veamos que $A: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$ es holomorfa. La transformación $g_\alpha = jz + A(\alpha)$ está generada por un lazo $\gamma \in \pi_1(\mathbb{C} \setminus \{0, 1\}, a)$. Si fijamos este lazo obtenemos una función $\Phi_\gamma: \mathbb{C} \times T_a \rightarrow T_a$, donde $T_a = h^{-1}(a) \simeq \mathbb{C}/\Gamma$ es una transversal a todas las foliaciones $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, $\alpha \in \mathbb{C}$. Esta función está definida como $\Phi_\gamma(\alpha, p) = g_\alpha$, esto quiere decir que para $\alpha \in \mathbb{C}$ fijo, $\Phi_\gamma(\alpha, z) = jz + A(\alpha)$ es uno de los dos generadores del grupo de holonomía global G_α . Como las soluciones de la ecuación diferencial que genera a cada una de estas foliaciones en una vecindad de cada punto dependen de manera holomorfa de las condiciones iniciales y del parámetro α (teorema 2.1.1), tenemos que $A(\alpha)$ es holomorfa.

Para ver que $A(\alpha)$ es no constante veremos que los grupos de holonomía de las foliaciones $\tilde{\mathcal{F}}_0$ y $\tilde{\mathcal{F}}_1$ tienen distinto número de elementos y por lo tanto $A(0) \neq A(1)$.

Por la proposición 4.3.1 tenemos que

$$H_1 = \frac{(x-j^2)(y-j)(y-j^2x)}{(x-j)(y-j^2)(y-jx)} = \frac{p_1}{q_1},$$

es una primera integral racional de \mathcal{F}_1 . Por el teorema de Bézout tenemos que $\{p_1 = 0\}$ interseca a $\{q_1 = 0\}$ en nueve puntos y cada uno de estos puntos está en todas las curvas de nivel de H_1 . Con un razonamiento similar, la curva de nivel $H_\infty^{-1}(a) = \Pi(T_a)$ siempre pasa por los nueve puntos de intersección de $\{p_\infty = y^3 - 1 = 0\}$ y $\{q_\infty = x^3 - 1 = 0\}$. Con esto no es difícil convencerse (ver figura 4.1) que $H_1^{-1}(c)$ interseca a $H_\infty^{-1}(a)$ en los seis puntos $(1, j)$, $(1, j^2)$, $(j, 1)$, (j, j) , $(j^2, 1)$ y (j^2, j^2) . Así, de los nueve puntos de intersección de $H_1^{-1}(c)$ y $H_\infty^{-1}(a)$, sólo tres de ellos no son alguno de los doce puntos que explota la transformación $\Pi: M \rightarrow \mathbb{C}\mathbb{P}^2$. Las intersecciones en cada uno de estos seis puntos es transversal y entonces, al explotar, estas intersecciones desaparecen y por lo tanto el transformado estricto de $H_1^{-1}(c)$ bajo Π (que es una hoja de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_1$) interseca a $T_a = \Pi^{-1}(H_\infty^{-1}(a))$ en tres puntos. Esto implica que el grupo de holonomía global G_1 sólo tiene tres elementos y así $f_1(z) = g_1(z) = jz$. Por lo tanto, $A(0) = 0$.

A continuación veremos que $A(0) \neq 0 \pmod{\Gamma}$. Notemos primero que

$$H_0(x, y) = \frac{x^3(y^3 - 1)}{y^3(x^3 - 1)} = \frac{p_0}{q_0},$$

es una primera integral racional de \mathcal{F}_0 . En efecto,

$$q_0^2 dH_0 = q_0 dp_0 - p_0 dq_0 = 3x^2 y^2 [x(x^3 - 1) dy - y(y^3 - 1) dx].$$

La recta $\{x = 0\}$ que es parte de la curva de nivel cero de H_0 corta a $H_\infty(a)$ en tres puntos $(0, y_k)$, donde y_1, y_2, y_3 son las raíces de $a = y^3 - 1$. $H_0^{-1}(0)$ tiene multiplicidad tres a lo largo de la recta $\{x = 0\}$ así que para b cercana a 0, $H_0^{-1}(b)$ interseca a $H_\infty^{-1}(a)$ en nueve puntos pues cada uno de los puntos de intersección $(0, y_k)$, al variar b , se separa en tres puntos cercanos a $(0, y_k)$ y además, para b suficientemente pequeña ninguno de estos nueve puntos coincide con los puntos que explota Π . Por lo tanto, al explotar, el transformado estricto de $H_0^{-1}(b)$ interseca a la transversal $T_a = h^{-1}(a)$ en al menos nueve puntos y así, el grupo G_0 tiene al menos nueve elementos. Esto quiere decir que $A(0) \neq 0$. Ahora podemos probar el siguiente teorema.

Teorema 4.6.1. *Para la familia \mathcal{F}_α de foliaciones de $\mathbb{C}\mathbb{P}^2$ existe un subconjunto denso de parámetros $E \subset \overline{\mathbb{C}}$ tal que si $\alpha \in E$, la foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional.*

Demostración. Como la función $A: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$ es holomorfa y no constante, $E = A^{-1}(\mathbb{Q} \oplus j\mathbb{Q})$ es un subconjunto denso de \mathbb{C} . Si $\alpha \in E$ tenemos que $A(\alpha) \in \mathbb{Q} \oplus j\mathbb{Q}$ y por lo tanto existe $n \in \mathbb{N}$ tal que $nA(\alpha) \in \Gamma = \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}$. De acuerdo al teorema 4.5.2 la foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional. \square

Si $\alpha \in E \subset \overline{\mathbb{C}}$ entonces la foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional. Recordemos que el hecho de que la foliación \mathcal{F}_α tenga primera integral racional es equivalente a que exista $k = k(\alpha) \in \mathbb{N}$ tal que $k(\alpha)A(\alpha) \in \Gamma$ (proposición 4.5.2). Si $k(\alpha)$ es el número más pequeño que cumple esta propiedad, en la prueba del corolario 4.5.1 vimos que el grupo de holonomía global G_α tiene $3k(\alpha)^2$ elementos.

Lema 4.6.1. *Si el grupo de holonomía global G_α tiene $k(\alpha)^2$ elementos, entonces el grado $d(\alpha)$ de la primera integral de la foliación \mathcal{F}_α cumple $k(\alpha)^2 \leq d(\alpha)$.*

Demostración. Sea L una hoja de la foliación \mathcal{F}_α y \tilde{L} su transformado estricto bajo Π , como la transversal $H_\infty^{-1}(a)$ es una curva algebraica de grado tres, por el teorema de Bézout tenemos que,

$$3d(\alpha) = \#\{L \cap H_\infty^{-1}(a)\} \geq \#\{\tilde{L} \cap h_\infty^{-1}(a)\} = \#G_\alpha = 3k(\alpha)^2.$$

\square

Teorema 4.6.2. *Dado un natural $n_0 \in \mathbb{N}$ el subconjunto $E_{n_0} := \{\alpha \in E; k(\alpha) \leq n_0\} \cup \{\infty\}$ es finito. Es decir, las foliaciones \mathcal{F}_α de \mathbb{CP}^2 con primera integral racional de grado $d(\alpha) \leq n_0$ son un número finito.*

Demostración. Si el conjunto E_{n_0} fuera infinito tendríamos que para algún número $r \in \{1, \dots, n_0\}$, el conjunto $E_r := \{\alpha \in E_{n_0}; k(\alpha) = r\} \cup \{\infty\}$ es infinito. Del corolario 4.5.1 tenemos que para todo $\alpha, \beta \in E_r$, $A(\alpha) = A(\beta) \pmod{\Gamma}$ y entonces el subconjunto E_r tiene una sucesión convergente $\{a_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ tal que $A(a_i) = A(\alpha) = A(\beta)$ para toda $i \in \mathbb{N}$ esto implica que $A(z)$ es constante lo cual es una contradicción. \square

4.7. El género de las hojas de \mathcal{F}_α .

Cuando una curva algebraica C es suave, tiene lugar la fórmula de Plücker,

$$g = \frac{1}{2}(n-1)(n-2),$$

donde g es el género de C y n es el grado de C (ver [4]), relaciona el grado de la curva algebraica con su género. En el caso de que la curva algebraica C sea singular, debemos desingularizarla para así obtener una superficie de Riemann compacta S y una aplicación holomorfa $\varphi: S \rightarrow C$ que es un biholomorfismo fuera de $S \setminus \varphi^{-1}(\text{sing}(C))$, donde $\text{sing}(C)$ es el conjunto de puntos singulares de la curva C y luego calcular el género de la superficie S . La curva algebraica C y la superficie S guardan una estrecha relación, si a S le quitamos las preimágenes de los puntos que explota φ y a C le quitamos los puntos que explota φ , φ es un biholomorfismo, así que definimos el género de C como el género de S (ver apéndice A.3).

En nuestro caso, si $\alpha \in \{1, j, j^2, \infty\}$ las proposiciones 4.3.2 y 4.4.2 nos dicen que las hojas irreducibles que no están contenidas en las nueve líneas que deja invariante la foliación

\mathcal{F}_α son toros biholomorfos a $\mathbb{C}/\mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z} = \mathbb{C}/\Gamma$. Cuando $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$ la proposición 4.3.1 nos asegura que al explotar mediante $\Pi: M \rightarrow \mathbb{CP}^2$ a los doce puntos radiales de la foliación \mathcal{F}_α , cualquier hoja L de la foliación que no pase por ninguno de los nueve puntos silla $q_i(\alpha)$ se transforma en una superficie de Riemann \tilde{L} . En el caso particular en que la foliación \mathcal{F}_α tiene primera integral racional ($\alpha \in E$), vamos a construir una aplicación cubriente $\pi: \tilde{L} \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$ donde \tilde{L} es una hoja “genérica” de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$. Esto implica que la hoja $L = \Pi(\tilde{L})$ de la foliación \mathcal{F}_α , $\alpha \in E$ tiene género uno pues por la proposición 4.5.2 la hoja \tilde{L} es una superficie de Riemann compacta.

Para poder definir la aplicación cubriente vamos necesitar algunas definiciones.

Definición 4.7.1. Sea $G = \langle jx, jx + A \rangle$ un subgrupo de biholomorfismos de \mathbb{C}/Γ generado por dos elementos, decimos que $b \in \mathbb{C}/\Gamma$ es *genérico* para el grupo G si el único elemento $f \in G$ que fija a b es la identidad. Es decir, $b \in \mathbb{C}/\Gamma$ es genérico si su estabilizador, G_b es trivial.

En el caso particular en que $\alpha \in E$, el grupo G_α que actúa en \mathbb{C}/Γ es finito, así, hay un número finito de estabilizadores y cada estabilizador fija un número finito de puntos. Por lo tanto, el conjunto de puntos de \mathbb{C}/Γ que no son genéricos para G_α es un conjunto finito y así, el conjunto de puntos genéricos es denso y no numerable.

Definición 4.7.2. Diremos que una hoja \tilde{L} de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ es *genérica* si $\tilde{L} \cap T_a$ tiene un punto genérico, donde $T_a = h^{-1}(a) \simeq \mathbb{C}/\Gamma$ es una transversal a todas las hojas de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$.

Notemos que la condición de ser una hoja genérica no depende del punto $b \in \tilde{L} \cap T_a$. En efecto, si denotamos por L a $\tilde{L} \setminus h^{-1}(0, 1, \infty)$, la restricción de h a L es una aplicación cubriente y así, $L \cap T_a = \tilde{L} \cap T_a$ es la fibra $h^{-1}(a)$ de esta aplicación cubriente. Como la acción de monodromía de toda aplicación cubriente es transitiva, todos los puntos tienen estabilizadores conjugados. Así, si un punto $b \in L \cap T_a$ es genérico, todos los puntos en $\tilde{L} \cap T_a$ son genéricos.

Como en el caso en que $\alpha \in E$ el grupo de holonomía global G_α es finito, los puntos $b \in T_a$ que son genéricos son densos y no numerables. Por lo tanto, si $\alpha \in E$ el conjunto de hojas genéricas de la foliación \mathcal{F}_α es denso y no numerable.

Una hoja \tilde{L}_1 de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_1$ es biholomorfa a \mathbb{C}/Γ . Dado $\alpha \in E$ y una hoja genérica \tilde{L} de la foliación \mathcal{F}_α , vamos a construir una aplicación cubriente $\pi: \tilde{L} \rightarrow \tilde{L}_1$. Denotemos por h_0 y h_1 a las restricciones de $h = H \circ \Pi$ a las hojas \tilde{L} y \tilde{L}_1 respectivamente y denotemos por L y L_1 a $\tilde{L} \setminus \{0, 1, \infty\}$ y $\tilde{L}_1 \setminus \{0, 1, \infty\}$.

Escojamos un punto $b \in L \cap T_a$ y un punto $b_1 \in L_1 \cap T_a$ y definamos $\pi(b) = b_0$, vamos a definir π de tal manera que $h_0 = h_1 \circ \pi$. Sean $x \in \tilde{L}$ y $\tilde{\gamma}: [0, 1] \rightarrow L$ un camino en L que una b con x . Al aplicar h_0 , $\tilde{\gamma}$ se convierte en una curva $\gamma: [0, 1] \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$ que podemos levantar a una curva $\hat{\gamma}: [0, 1] \rightarrow L_1$ mediante la aplicación cubriente h_1 . Definimos $\pi(x) = \hat{\gamma}(1)$.

Veamos que $\pi(x)$ no depende del camino $\tilde{\gamma}$ que une a b con x . Como es usual, basta ver que si $\tilde{\gamma}$ es un camino cerrado basado en b , $\hat{\gamma}(1) = b_1$. La transformación de holonomía $k: \mathbb{C}/\Gamma \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$ del grupo G_α asociada a la curva $\gamma = h_0 \circ \tilde{\gamma}$ deja fijo al punto b , y como la hoja \tilde{L} es genérica, la transformación k tiene que ser la identidad. Así, si escribimos a γ como producto de los dos generadores del grupo fundamental de $\mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$, $\gamma = \gamma_1^{m_1} \circ \gamma_2^{n_1} \circ \dots \circ \gamma_1^{m_r} \circ \gamma_2^{n_r}$ podemos escribir a k como un producto de los generadores f_α y g_α del grupo de holonomía global G_α de la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$, obteniendo:

$$k(z) = f_\alpha^{m_1} \circ g_\alpha^{n_1} \circ \cdots \circ f_\alpha^{m_r} \circ g_\alpha^{n_r} = cz + d = z,$$

donde $c = j^{m_1 + \cdots + m_r}$. Como $c = 1$ tenemos que 3 divide a $m_1 + \cdots + m_r$. En la sección anterior vimos que en el grupo G_1 , los dos generadores f_1 y g_1 coinciden ($f_1(z) = jz$). Así, la transformación de holonomía del grupo G_1 asociada al lazo γ es $K(z) = j^{m_1 + \cdots + m_r} = j^{3p} = z$ y por lo tanto $\hat{\gamma}(b) = b_1$.

Hemos definido $\pi: L \rightarrow L_1$ de tal forma que $h_0 = h_1 \circ \pi$, y como h_1 es invertible de manera local, localmente tenemos que $\pi = h_1^{-1} \circ h_0$. Por lo tanto, es holomorfa y más aún, es un homeomorfismo local.

Ahora vamos a extender a π al conjunto $\tilde{L} \cap h^{-1}(0, 1, \infty)$. El conjunto $h^{-1}(0, 1, \infty)$ está formado por tres divisores D_1, D_2 y D_3 que se obtienen de explotar los puntos $[1 : 0 : 0]$, $[0 : 1 : 0]$ y $[0 : 0 : 1]$ y por el transformado estricto \tilde{l}_k de las nueve rectas l_k que deja invariante toda foliación \mathcal{F}_α de la familia (ver observación 4.4.1). Como la foliación $\tilde{\mathcal{F}}_\alpha$ deja invariante al transformado estricto de estas nueve rectas y la hoja \tilde{L} no pasa por ningún punto silla $q_k(\alpha)$ (estas hojas no son genéricas), entonces las intersecciones tanto de \tilde{L} como de \tilde{L}_1 con el conjunto $h^{-1}(0, 1, \infty)$ están contenidas en el conjunto $D_1 \cup D_2 \cup D_3$. Vamos a definir π para los puntos en $\tilde{L} \cap D_1$, donde D_1 es el divisor obtenido al explotar el punto $(0, 0)$, para definirla en los otros divisores podemos usar el corolario 4.1.2 y la definición de π para los puntos en $\tilde{L} \cap D_1$.

La hoja \tilde{L}_1 queda descrita por $\tilde{h}_1^{-1}(e) = (H_1 \circ \Pi)^{-1}(e)$, $e \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$, donde $H_1(x, y) = \frac{(x-j^2)(y-j)(y-j^2x)}{(x-j)(y-j^2)(y-jx)}$ es una primera integral de la foliación \mathcal{F}_1 de \mathbb{CP}^2 y $\Pi: M \rightarrow \mathbb{CP}^2$ es la transformación que explota los doce puntos radiales de la foliación \mathcal{F}_α . Usando la carta (x, u) de M en la cual $\Pi(x, u) = (x, ux)$ tenemos que $\tilde{h}_1(x, u) = \frac{(x-j^2)(ux-j)(u-j^2)}{(x-j)(ux-j^2)(u-j)}$. Al evaluar en el divisor $D_1 = \{x = 0\}$ obtenemos $\tilde{h}_1(0, u) = \frac{u-j^2}{u-j}$ y por lo tanto, la intersección de $\tilde{L}_1 = h^{-1}(e)$ con el divisor $D_1 = \{x = 0\}$ es el punto $(0, \frac{j^2 - je}{1 - e}) := p_0$. Así, la hoja \tilde{L}_1 interseca en único punto p_0 y para todo $q \in \tilde{L} \cap D_1$ definimos $\pi(q) = p_0$.

Veamos que π también es holomorfa y un homeomorfismo local en los puntos $q \in \tilde{L} \cap h^{-1}(1)$. Por el lema 4.5.2 para cada punto $q \in \tilde{L} \cap h^{-1}(1)$ y $p_0 \in \tilde{L}$ existen coordenadas z y w de \tilde{L} y \tilde{L}_1 alrededor de q y p respectivamente tales que $h_0(z) = 1 + z^3$ y $h_1(w) = 1 + w^3$. Como $h_0 = h_1 \circ \pi$ fuera del conjunto $D_1 \cap \tilde{L}$ tenemos que $z^3 = (w(\pi(z)))^3$ para toda $z \neq 0$. Así, $w(\pi(z)) = j^i z$ y por lo tanto π es holomorfa y un homeomorfismo local alrededor de cada punto $q \in \tilde{L} \cap h^{-1}(1)$.

Para ver que π es una aplicación cubriente basta mostrar que cumple la propiedad de levantamiento de curvas. Sea $\tilde{\gamma}: [0, 1] \rightarrow \tilde{L}_1$ una curva en la hoja \tilde{L}_1 y consideremos la curva $\gamma := h_1 \circ \tilde{\gamma}$. Usando a h_0 podemos levantar a la curva γ a una curva $\hat{\gamma}: [0, 1] \rightarrow \tilde{L}_0$. Afirmamos que $\hat{\gamma}$ es un levantamiento de $\tilde{\gamma}$. En efecto, como $\hat{\gamma}$ es un levantamiento de γ tenemos que $h_1 \circ \hat{\gamma} = \gamma = h_0 \circ \hat{\gamma}$, pero por construcción, $h_0 = h_1 \circ \pi$ y así, $h_1 \circ \hat{\gamma} = (h_1 \circ \pi) \circ \hat{\gamma}$ y como h_1 es un homeomorfismo local tenemos que punto a punto $\tilde{\gamma} = \pi \circ \hat{\gamma}$. Hemos probado así, la siguiente proposición.

Proposición 4.7.1. *Si la foliación \mathcal{F}_α de \mathbb{CP}^2 tiene primera integral racional, entonces casi cualquier hoja de la foliación tiene género uno.*

Como vimos en la sección anterior, podemos escoger un parámetro α de tal forma que el grado de la primera integral de la foliación \mathcal{F}_α sea arbitrariamente grande, pero como afirma la proposición anterior, el género de las soluciones es uno.

4.8. Familias con hojas de género arbitrariamente grande.

En esta sección vamos a usar la función $F(U, V, W) = (U^r, V^r, W^r)$, $r \in \mathbb{N}$ para jalar a la familia de foliaciones $(\mathcal{F}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$ de \mathbb{CP}^2 . Notemos que la función F sí define una función en \mathbb{CP}^2 pues respeta las clases. Veremos que si $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$ la familia de foliaciones $(\mathcal{K}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$, donde $\mathcal{K}_\alpha := F^*(\mathcal{F}_\alpha)$, tiene singularidades de tipo analítico fijo y cada foliación de la familia es de grado $3r + 1$. Sabemos que para un conjunto denso de parámetros $E \subset \bar{\mathbb{C}}$, si $\alpha \in E$ entonces la foliación \mathcal{F}_α tiene una primera integral racional y dado $k \in \mathbb{N}$, el subconjunto de parámetros de E cuya foliación asociada tiene una primera integral racional de grado menor que k es finito. Si jalamos estas primeras integrales con la función F observamos que la familia $(\mathcal{K}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$ también cumple estas dos propiedades. La gran diferencia entre las familias $(\mathcal{K}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$ y $(\mathcal{F}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$ es que para la familia $(\mathcal{K}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$, dado un número $k \in \mathbb{N}$, las foliaciones de la familia cuya hoja genérica tiene género menor que k es un conjunto finito mientras que para la familia $(\mathcal{F}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$, una hoja genérica tiene género uno (ver sección anterior).

Antes de empezar a jalar las foliaciones haremos un cambio de coordenadas que lleve tres rectas l_1, l_2, l_3 que deja invariante cualquier foliación \mathcal{F}_α tales que $l_1 \cap l_2 \neq l_1 \cap l_3$, en los ejes coordenados $\{U = 0\}, \{V = 0\}$ y $\{W = 0\}$. Una vez hecho este cambio usamos la función $F(U, V, W) = (U^r, V^r, W^r)$, $r \in \mathbb{N}$ para definir a la familia $(\mathcal{K}_\alpha)_{\alpha \in \bar{\mathbb{C}}}$, como $\mathcal{K}_\alpha = F^*(\mathcal{F}_\alpha)$. Notemos que las rectas $\{UVW = 0\}$ son invariantes bajo la función F y como también son hojas de la foliación \mathcal{F}_α , estas rectas también son hojas de la foliación \mathcal{K}_α . Así mismo, los puntos de ramificación de F están todos en las rectas $\{UVW = 0\}$. Estas rectas tienen 12 puntos singulares de la foliación \mathcal{F}_α , $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$, 9 puntos radiales y 3 puntos sillas. De los 9 puntos radiales, los puntos $[1 : 0 : 0], [0 : 1 : 0]$ y $[0 : 0 : 1]$ sólo tienen una preimagen bajo F mientras que los otros 6 puntos radiales y los 3 puntos silla tienen r preimágenes. Así, estos 12 puntos singulares generan $9r + 3$ puntos singulares para la foliación \mathcal{K}_α .

Los 9 puntos singulares restantes de la foliación \mathcal{F}_α no son valores críticos de la función F y cada uno de ellos tiene r^2 preimágenes. En total, la foliación tiene $9r^2 + 9r + 3 = (3r + 1)^2 + (3r + 1) + 1$. Por lo tanto, si mostramos que cada uno de estos puntos singulares es no degenerado, la foliación \mathcal{K}_α , $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$ es de grado $3r + 1$ (ver teorema 2.7.1).

Proposición 4.8.1. *Todas las singularidades de la foliación \mathcal{K}_α , $\alpha \notin \{1, j, j^2, \infty\}$ son no degeneradas.*

Demostración. Basta probar la proposición para los puntos singulares de \mathcal{K}_α que están en las rectas $\{UVW = 0\}$ ya que en todos los demás puntos singulares, F es un biholomorfismo local y todos los puntos singulares de la foliación \mathcal{F}_α son no degenerados (proposición 4.3.1).

Los puntos $[1 : 0 : 0], [0 : 1 : 0]$ y $[0 : 0 : 1]$ se aplican bajo F en ellos mismos y la foliación \mathcal{F}_α tiene por primera integral local alrededor de estos puntos a la función $\frac{y}{x}$, así \mathcal{K}_α tiene por primera local a $\frac{v^r}{u^r}$ y esta función genera la misma foliación que la función $\frac{v}{u}$. Los valores propios del campo vectorial que generan esta foliación son iguales y distintos de cero y por lo tanto los puntos singulares $[1 : 0 : 0], [0 : 1 : 0]$ y $[0 : 0 : 1]$ son no degenerados.

Para cualquier punto de la forma $(u, 0)$, $u \neq 0$ podemos encontrar coordenadas tal que $F(u, v) = (u, v^r)$. Así, los puntos singulares de la foliación \mathcal{K}_α que F aplica en un punto silla de la foliación \mathcal{F}_α tienen por primera integral a la función $u^3 v^r$ y localmente esta función genera la misma foliación que el campo vectorial $X = ru \frac{\partial}{\partial u} + -3v \frac{\partial}{\partial v}$ que es no degenerado. De manera análoga, un punto que F aplique en un punto radial tiene por primera integral local a $\frac{v^r}{u}$ y así la foliación está generada, de manera local por $X = ru \frac{\partial}{\partial u} + v \frac{\partial}{\partial v}$. \square

Recordemos que $E \subset \bar{\mathbb{C}}$ es el conjunto de parámetros para los cuales la foliación \mathcal{F}_α , y por lo tanto la foliación \mathcal{K}_α tiene una primera integral racional.

Definición 4.8.1. Diremos que una hoja L de la foliación \mathcal{K}_α , $\alpha \in E$ es *genérica*, si la hoja $F(L)$ de la foliación \mathcal{F}_α es genérica (ver definición 4.7.2).

A continuación vamos a estudiar el género de una hoja genérica de la foliación \mathcal{K}_α . Para ello vamos a usar la función $F: L \rightarrow F(L)$ y la fórmula de Riemann-Hurwitz. Observemos que no podemos aplicar directamente esta fórmula pues L y $F(L)$ podrían no ser superficies de Riemann ya que como curvas algebraicas pueden tener autointersecciones en los puntos singulares de un campo vectorial que genere a la foliación \mathcal{K}_α . Por eso, tenemos que considerar la resolución de singularidades (ver apéndice A.3) $\Pi: S \rightarrow L$ y $\Pi_1: \tilde{S} \rightarrow F(L)$ de ambas hojas y aplicar la fórmula de Riemann-Hurwitz a la función F_1 que hace conmutar el diagrama siguiente (F_1 es una función entre superficies de Riemann compactas a la cual si podemos aplicar la fórmula de Riemann-Hurwitz).

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{F_1} & \tilde{S} \\ \Pi \downarrow & & \downarrow \Pi_1 \\ L & \xrightarrow{F} & F(L) \end{array}$$

Para construir a la función F_1 solo hay que extender la función $\tilde{F}_1 = \Pi^{-1} \circ F \circ \Pi: S \setminus (Sing(L)) \rightarrow \tilde{S}$ al conjunto $\Pi^{-1}(Sing(L))$. Si $x \in \Pi^{-1}(Sing(L))$ y $q := \Pi(x)$, una vecindad V_x suficientemente pequeña de x se aplica bajo $F \circ \Pi$ en una rama $C_{F(q)}$ de $F(L)$ por el punto $F(q)$, esta rama bajo Π^{-1} se aplica de manera biholomorfa en una vecindad W , en W hay un único y tal que $\Pi_1(y) = F(q) = F(\Pi(x))$. Así podemos definir $F_1(x)$ como y .

En la sección anterior vimos que la superficie \tilde{S} es un toro y por lo tanto, si denotamos por z_1, \dots, z_k a los puntos de ramificación de F_1 , la fórmula de Riemann-Hurwitz se reduce a:

$$\chi(L) = - \sum_{i=1}^k (n_i - 1), \quad (4.7)$$

donde n_i es la multiplicidad de z_i en F_1 . Vamos a estudiar pues los puntos de ramificación de la función F_1 .

Proposición 4.8.2. *Sea L una hoja genérica de la foliación \mathcal{K}_α , si $\Pi: S \rightarrow L$ y $\Pi_1: \tilde{S} \rightarrow F(L)$ son la resolución de singularidades de L y $F(L)$ respectivamente, entonces cada punto de ramificación de $F_1: S \rightarrow \tilde{S}$ tiene multiplicidad r .*

Demostración. Como observamos anteriormente los puntos de ramificación de la función F están en las rectas $\{UVW = 0\}$ y si la hoja L es genérica, L no pasa por ninguno de los puntos silla que se encuentran en estas rectas.

De estos puntos, aquellos que tienen primera integral local $\frac{v^r}{u}$, necesitamos explotar r veces para resolver todas las hojas que pasan por este punto singular (ver ejemplo 2.6.1). En la última explosión obtenemos un divisor D el cual interseca de manera transversal todas las hojas que pasaban por el punto singular original. En una carta adecuada (t, v) este divisor queda descrito por $D = \{v = 0\}$ y la composición de todas las explosiones adquiere la expresión $\Pi(t, v) = (tv^r, v)$. Así, $F \circ \Pi(t, v) = (tv^r, v^r)$ (estamos usando las coordenadas en las que $F(u, v) = (u, v^r)$). Para resolver a la curva $F(L)$ sólo necesitamos explotar una vez cada punto singular de $F(L)$ (proposición 4.3.1) y así, en cada uno de estos puntos Π_1^{-1} adquiere la expresión local $\Pi_1^{-1}(x, y) = (\frac{y}{x}, y) = (z, w)$ y por lo tanto, $F_1(t, v) = \Pi_1^{-1} \circ F \circ \Pi(t, v) = (t, v^r)$.

Como la superficie S interseca al divisor $\{v = 0\}$ y lo mismo ocurre con la superficie \tilde{S} y el divisor $\{w = 0\}$, podemos ver de manera local a S y \tilde{S} como gráfica de algunas funciones holomorfas $t(v)$ y $z(w)$. En estas cartas F_1 adquiere la expresión $v \mapsto (t(v), v) \mapsto (t(v), v^r) \mapsto v^r$ y por lo tanto este punto tiene multiplicidad r . Para los otros 3 puntos singulares restantes un cálculo análogo muestra la proposición. \square

Proposición 4.8.3. *Sea $k \in \mathbb{N}$, entonces las foliaciones \mathcal{K}_α , $\alpha \in E$, cuyas hojas genéricas tienen género menor que k son un número finito*

Demostración. Sea L una hoja genérica de la foliación \mathcal{K}_α . Si la primera integral de la foliación \mathcal{F}_α es de grado d_α , entonces la hoja L es de grado rd_α . Por el teorema de Bézout, $\#L \cap \{UVW = 0\} = 3rd_\alpha$, por la proposición anterior, tenemos $3rd_\alpha$ puntos de ramificación cada uno con multiplicidad r . Por la fórmula de Riemann-Hurwitz, $\chi(L) < -3rd_\alpha$ y por lo tanto el género de L es más grande que d_α . De acuerdo al teorema 4.6.2 sólo hay un número finito de parámetros para los cuales $d_\alpha < k$. Así, sólo un número finito de foliaciones \mathcal{K}_α tienen hojas genéricas con género menor que k . \square

Apéndice A

Superficies de Riemann.

En este apéndice veremos algunos resultados básicos sobre superficies de Riemann.

Definición A.0.2. Sea X un espacio topológico, una *carta compleja* en X es un homeomorfismo $\phi: U \rightarrow V$, donde $U \subset X$ es un subconjunto abierto de X y $V \subset \mathbb{C}$ es un subconjunto abierto de \mathbb{C} . Diremos que dos cartas complejas $\phi_1: U_1 \rightarrow V_1, \phi_2: U_2 \rightarrow V_2$ son *compatibles* si $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ ó $\phi_2 \circ \phi_1^{-1}: (V_1 \cap V_2) \rightarrow (V_1 \cap V_2)$ es una función holomorfa.

Ejemplo A.0.1. Si $X = \mathbb{S}^2$ entonces la proyección estereográfica desde el polo norte ó el polo sur $\phi_1: \mathbb{S}^2 \setminus \{N\} \rightarrow \mathbb{C}, \phi_2: \mathbb{S}^2 \setminus \{S\} \rightarrow \mathbb{C}$ son cartas complejas que además son compatibles pues $\phi_1(\mathbb{S}^2 \setminus \{N\} \cap \mathbb{S}^2 \setminus \{S\}) = \phi_1(\mathbb{S}^2 \setminus \{N, S\}) = \mathbb{C} \setminus \{0\}$ y $\phi_2 \circ \phi_1^{-1}(z) = \frac{1}{z}$.

Definición A.0.3. Un *atlas complejo* en un espacio topológico X es una colección de cartas complejas compatibles $\mathcal{A} = \{\phi_\alpha: U_\alpha \rightarrow V_\alpha\}$ tal que $X = \cup_\alpha U_\alpha$. Diremos que dos atlas \mathcal{A} y $\tilde{\mathcal{A}}$ son *compatibles* si toda carta del atlas \mathcal{A} es compatible con toda carta del atlas $\tilde{\mathcal{A}}$.

De la definición anterior se sigue inmediatamente que la relación ser compatible induce una relación de equivalencia en el conjunto de atlas de un espacio topológico X .

Definición A.0.4. Una *estructura compleja* en un espacio topológico X es una clase de equivalencia en el conjunto de atlas de X .

Definición A.0.5. Una *superficie de Riemann* es un espacio topológico X , conexo, Hausdorff y segundo numerable junto con una estructura compleja.

Ejemplo A.0.2. El toro. Sean ω_1 y ω_2 dos números complejos linealmente independientes sobre \mathbb{R} . Al subgrupo aditivo de \mathbb{C} , $\Gamma := \omega_1\mathbb{Z} \oplus \omega_2\mathbb{Z}$ lo llamaremos la retícula generada por ω_1 y ω_2 . Vamos a dotar al grupo cociente \mathbb{C}/Γ de una estructura compleja. Si a \mathbb{C}/Γ le damos la topología cociente, entonces \mathbb{C}/Γ es un espacio Hausdorff y segundo numerable y la proyección canónica $\Pi: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}/\Gamma$ que a cada punto asocia su clase de equivalencia es una función continua y abierta. Las cartas que van a dar una estructura compleja a \mathbb{C}/Γ las obtenemos de la siguiente manera. Sea $V \subset \mathbb{C}$ un abierto tal que cualesquiera dos puntos en V no son equivalentes bajo Γ . Entonces, $U := \Pi(V)$ es un abierto y $\Pi: V \rightarrow U$ es un homeomorfismo y su inversa es una carta de \mathbb{C}/Γ . Si \mathcal{A} es la colección de todas las cartas que se obtienen de esta manera entonces cualesquiera dos cartas $\phi_i: U_i \rightarrow V_i, i = 1, 2$ son compatibles. En efecto, si $V_1 \cap V_2 \neq \emptyset$ entonces el cambio de coordenadas es la identidad y si $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ entonces el cambio de coordenadas es una traslación por algún elemento de Γ .

Notemos además que la función que a un punto $\lambda\omega_1 + \mu\omega_2 \in \mathbb{C}/\Gamma$ le asocia el punto $(e^{2\pi i\lambda}, e^{2\pi i\mu}) \in \mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1$ es un homeomorfismo entre \mathbb{C}/Γ y $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1$.

A.1. Funciones entre superficies de Riemann.

Definición A.1.1. Sea $f: X \rightarrow Y$ una función entre dos superficies de Riemann. Diremos que f es *holomorfa* en $p \in X$ si existen cartas ϕ_1 y ϕ_2 alrededor de p y $F(p)$ respectivamente tal que la composición $\phi_2 \circ f \circ \phi_1^{-1}$ es holomorfa.

La definición anterior no depende de las cartas que se usen para verificar si f es holomorfa. El siguiente teorema muestra que una función holomorfa entre superficies de Riemann tiene un comportamiento local sencillo.

Teorema A.1.1. *Sea $f: X \rightarrow Y$ una función holomorfa no constante en $p \in X$. Entonces existe un entero $k \geq 1$ cartas $\phi_1: U_1 \rightarrow V_1, \phi_2: U_2 \rightarrow V_2$ alrededor de p y $f(p)$ respectivamente tal que $\phi_2 \circ f \circ \phi_1^{-1} = z^k$.*

Demostración. Dadas cualesquiera cartas ψ y ϕ_2 alrededor de p y $f(p)$ respectivamente, al componer con una traslación (que es una función biholomorfa), siempre podemos suponer que $\psi(p) = \phi_2(f(p)) = 0$. Una vez hecha esta traslación tenemos que $f_1(0) := \phi_2 \circ f \circ \psi^{-1}(0) = 0$ y por lo tanto existe un entero $k \geq 1$ y una función g tal que $f_1(z) = z^k g(z)$, donde $g(0) \neq 0$. Por continuidad la función g no se anula en una vecindad del cero y entonces existe una función holomorfa h tal que $h^k = g$. Si llamamos $\eta(z) = zh(z)$ entonces $f_1(z) = (zh)^k = (\eta(z))^k$. Como $\eta'(0) = h(0) \neq 0$, la función η es invertible alrededor del cero y en consecuencia la composición $\phi_1 = \eta \circ \psi$ vuelve a ser una carta alrededor de p . En esta carta,

$$\begin{aligned} \phi_2 \circ f \circ \phi_1^{-1}(z) &= (\phi_2 \circ f \circ \psi^{-1}) \circ \eta^{-1}(z) \\ &= f_1 \circ \eta^{-1}(z) \\ &= z^k. \end{aligned}$$

□

Corolario A.1.1. *Sean X, Y superficies de Riemann y $f: X \rightarrow Y$ una función holomorfa no constante. Entonces f es abierta.*

Demostración. Por el teorema anterior para cualquier abierto U suficientemente pequeño de X , $f(U)$ es abierto en Y . □

Teorema A.1.2. *Sean X, Y superficies de Riemann. Si X es compacta y $f: X \rightarrow Y$ es una función holomorfa no constante, entonces Y es compacta y f es suprayectiva.*

Demostración. Por el corolario anterior, $f(X)$ es un subconjunto abierto de Y . Como X es compacto, $f(X)$ es compacto y por lo tanto cerrado en Y . De la conexidad de Y se sigue que $f(X) = Y$ y en consecuencia Y es compacto y f es suprayectiva. □

El entero $k \geq 1$ que aparece en el teorema A.1.1 no depende de las cartas pues este número coincide con el número de preimágenes que tiene un punto $y \in Y$ suficientemente cercano a $f(p)$, y si contamos con multiplicidades, el valor $f(p)$ también tiene k preimágenes.

Definición A.1.2. Sea $f: X \rightarrow Y$ una función holomorfa no constante en $p \in X$. La *multiplicidad* de f en $p \in X$ es el único entero k tal que en algunas coordenadas locales alrededor de p la función f se escribe como $z \mapsto z^k$. A este número lo denotaremos como $\text{mult}_p(f)$. A un punto $p \in X$ en el cual $\text{mult}_p(f) > 1$ lo llamaremos *punto de ramificación*.

Notemos que los puntos de ramificación de una función son aquellos en los cuales, en una carta local, la derivada se anula.

Ejemplo A.1.1. Sea $F: \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}$ una función holomorfa tal que para todos los puntos (x, y) tales que $F(x, y) = 0$ se tiene que $\frac{\partial F}{\partial x} \text{ ó } \frac{\partial F}{\partial y} \neq 0$. Bajo estas condiciones, por el teorema de la función implícita el conjunto $X := \{(x, y) \in \mathbb{C}^2; F(x, y) = 0\}$ es una superficie de Riemann. Si restringimos la proyección en el primer factor $\Pi: \mathbb{C}^2 \rightarrow \mathbb{C}$ obtenemos una función holomorfa entre superficies de Riemann. Si $(\frac{\partial F}{\partial y})_p \neq 0$ entonces, de manera local, la proyección es una carta alrededor de p y en consecuencia no hay puntos de ramificación. Si $(\frac{\partial F}{\partial y})_p = 0$, como $(\frac{\partial F}{\partial x})_p \neq 0$, existe una función ϕ tal que $F(\phi(y), y) = 0$. Al aplicar Π obtenemos la función $y \mapsto \phi(y)$, es decir ϕ es una expresión local de la función $\Pi: X \rightarrow \mathbb{C}$. Como $F(\phi(y), y) = 0$ al derivar respecto a y obtenemos $\frac{\partial F}{\partial x} \frac{d\phi}{dy} = 0$ y como $(\frac{\partial F}{\partial x})_p \neq 0$ tenemos que $\frac{d\phi}{dy} = 0$. Es decir, si $(\frac{\partial F}{\partial y})_p = 0$, p es un punto de ramificación de la proyección en el primer factor.

Teorema A.1.3. Sean X, Y superficies de Riemann compactas y $f: X \rightarrow Y$ una función holomorfa no constante. Si definimos,

$$d_y(f) = \sum_{p \in f^{-1}(y)} \text{mult}_p(f).$$

Entonces $d_y(f)$ es constante y no depende de $y \in Y$.

Demostración. Veremos que la función $y \mapsto d_y(f)$ es localmente constante y de la conexidad de Y se sigue que esta función es constante. Sea $y \in Y$, como X es compacta, $f^{-1}(y)$ es finito. Si $f^{-1}(y) = \{x_1, \dots, x_n\}$ por el teorema A.1.1 alrededor de cada x_i existen vecindades U_i tal que en coordenadas adecuadas $f: U_i \rightarrow Y$ se escribe como $z \mapsto z^{k_i}$. Por el corolario A.1.1 $f(U_i)$ es un subconjunto abierto de Y y en consecuencia $V := \cap f(U_i)$ es un subconjunto abierto. Por construcción, si $y_0 \in V$, $|f^{-1}(y_0)| = k_1 + \dots + k_n$. \square

El teorema anterior nos permite hacer la siguiente definición.

Definición A.1.3. Sea $f: X \rightarrow Y$ una función holomorfa no constante entre superficies de Riemann. El *grado* de f , denotado por $\text{deg}(f)$, es el entero $d_y(f)$ para cualquier $y \in Y$.

A.2. El género de una superficie de Riemann compacta.

Si a una función holomorfa $f: U \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ la pensamos como una función diferenciable $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ entonces el determinante de la matriz derivada de f (pensada como transformación en el plano real) en un punto $z = (x, y)$ es igual a la norma de $f'(z)$. En consecuencia, toda función holomorfa preserva la orientación. Como el cambio de coordenadas en una superficie de Riemann es una función holomorfa, tenemos que todos los cambios de coordenadas preservan la orientación. Así, toda superficie de Riemann es orientable.

Si además nuestra superficie de Riemann es compacta, el teorema de clasificación de superficies nos asegura que nuestra superficie de Riemann es una esfera ó un n -toro. Si

triangulamos a una de estas superficies X , su característica de Euler, $\chi(X) := (\# \text{caras}) - (\# \text{aristas}) + (\# \text{vértices})$ no depende de la triangulación y $\chi(X)$ es igual a $2 - 2g(X)$ donde $g(X)$ es el género de la superficie X . Como en una función holomorfa no constante $f: X \rightarrow Y$ entre superficies de Riemann compactas, $\deg(f)$ es constante, una buena idea es levantar una triangulación Y a una triangulación de X para así poder calcular la característica de Euler de la superficie X en términos de la característica de Euler de la superficie Y y la función f .

Teorema A.2.1. [Fórmula de Riemann-Hurwitz] Sea $f: X \rightarrow Y$ una función holomorfa no constante entre superficies de Riemann compactas. Entonces,

$$\chi(X) = \deg(f)\chi(Y) - \sum_{p \in X} (\text{mult}_p(f) - 1).$$

Demostración. Primero observemos que la suma que aparece en el lado derecho de la fórmula es una suma sobre los puntos de ramificación de f pues en los demás puntos $\text{mult}_p(f) = 1$. En una superficie de Riemann compacta los puntos de ramificación son finitos pues estos se corresponden con los puntos donde la función f adquiere la expresión $z \mapsto z^k, k > 1$, es decir, los puntos de ramificación son aquellos donde la derivada de f se anula, y en una superficie de Riemann compacta estos son un número finito.

Para mayor claridad supongamos primero que f no tiene puntos de ramificación, en este caso si tomamos una triangulación de Y con c caras, a aristas y v vértices, al levantar mediante f esta triangulación obtenemos una triangulación de X con $\tilde{c} = \deg(f)c$ caras, $\tilde{a} = \deg(f)a$ aristas y $\tilde{v} = \deg(f)v$ vértices. En consecuencia $\chi(X) = \deg(f)\chi(Y)$.

Si f tiene puntos de ramificación escogemos una triangulación de Y en la cual la imagen de cada punto de ramificación es un vértice. Como las caras y aristas de esta triangulación no pasan por puntos de ramificación, al levantar esta triangulación obtenemos una triangulación de X con $\tilde{c} = \deg(f)c$ caras y $\tilde{a} = \deg(f)a$ aristas. Para un vértice $y \in Y$, contando multiplicidades tiene $\deg(f)$ preimágenes pero para contar correctamente el número de vértices que obtenemos al levantar esta triangulación hay que quitar las multiplicidades, así, tenemos que $\tilde{v} = \deg(f)v - \sum_{p \in X} \text{mult}_p(f) - 1$. Por lo tanto $\chi(X) = \tilde{c} - \tilde{a} + \tilde{v} = \deg(f)\chi(Y) - \sum_{p \in X} (\text{mult}_p(f) - 1)$. \square

Ejemplo A.2.1. Consideremos la superficie de Riemann $X \subset \mathbb{C}\mathbb{P}^2$ definida por los ceros de $H(x, y, z) = y^3 - z^3 - c(x^3 - z^3), c \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$. Si consideramos la proyección Π en el eje x obtenemos una función $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$. Vamos a usar la fórmula de Riemann-Hurwitz y el ejemplo A.1.1 para calcular la característica de Euler de X . En la carta afín X queda descrita por $h = y^3 - 1 - c(x^3 - 1) = 0$. Si fijamos un valor x_0 entonces $y^3 - 1 - c(x_0^3 - 1) = 0$ de manera genérica tiene 3 soluciones, así, $\deg(\Pi) = 3$. Los puntos de ramificación son aquellos donde $(\frac{\partial h}{\partial y})_p = 3y^2 = 0$, es decir los puntos de ramificación son $((\frac{1-c}{c})^{1/3}, 0)$. Estos puntos sólo tienen una preimagen y por lo tanto la multiplicidad en cada uno de ellos es 3. Sustituyendo lo anterior en la fórmula de Riemann-Hurwitz obtenemos $\chi(X) = 3 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 0$. Esto quiere decir que X es un toro.

A.3. Resolución de singularidades y género de una curva algebraica.

Si tenemos una curva $C = \{f = 0\}$ el teorema de la función implícita nos asegura que $C \setminus \text{Sing}(C)$ es una superficie de Riemann. En esta sección analizaremos brevemente el

comportamiento de C en una vecindad de sus puntos singulares.

Notemos primero que $Sing(C)$ es un conjunto finito, en efecto, por el teorema de Bézout los ceros del gradiente de f forman un conjunto finito. Si suponemos que $p \in C$ es el origen entonces f no tiene parte lineal y en consecuencia ,

$$f(x, y) = p_k(x, y) + \cdots + p_n(x, y), \quad (\text{A.1})$$

donde $p_i \in \mathbb{C}[x, y]$ son polinomios homogéneos de grado i , $i > 1$. Si en esta última expresión llamamos *polinomio inicial* al polinomio homogéneo de menor grado, entonces el polinomio inicial p_k se descompone como un producto de k polinomios lineales (para lograr esto podemos deshomonogeneizar a p_k , obtener las raíces de $p(x, 1)$ y volver a homogeneizar). No es difícil convencerse de que cada una de las rectas correspondientes a los ceros de estos polinomios lineales son las rectas que más se asemejan a una recta tangente. De manera local, la curva C se parece a estas k rectas por el origen.

Si el polinomio f que define a la curva algebraica C es irreducible en el anillo $\mathbb{C}[x, y]$ la curva C también lo es y en consecuencia no podemos encontrar una expresión de la forma $C = C_1 \cup C_2$, donde C_1 y C_2 son curvas algebraicas mas sencillas que C . Es por eso que debemos mirar a f como un elemento del anillo $\mathbb{C}\{x, y\}$, el anillo de series convergentes centradas en el origen. Si $f \in \mathbb{C}\{x, y\}$ al conjunto $V(f) = \{f = 0\}$ lo llamaremos una curva analítica. El anillo $\mathbb{C}\{x, y\}$ es un dominio de factorización única y para toda curva analítica $V(f)$ se tiene una descomposición $V(f) = V(f_1) \cup \cdots \cup V(f_r)$ donde $f_i \in \mathbb{C}\{x, y\}$ es irreducible en $\mathbb{C}\{x, y\}$ (para una demostración de esto ver [4, cap. 6]). A los conjuntos $V(f_i)$ se les conoce como las *ramas de $V(f)$ por el origen*.

Ejemplo A.3.1. El polinomio $f(x, y) = y^2 - x^2(x + 1)$ es irreducible en $\mathbb{C}[x, y]$ pero en el anillo $\mathbb{C}\{x, y\}$ admite la factorización $f(x, y) = (y + x\sqrt{x + 1})(y - x\sqrt{x + 1})$.

Un hecho importante es que toda rama de una curva analítica admite una parametrización de la forma $x \mapsto (x, \varphi(x^{\frac{1}{n}}))$ donde φ es una serie de potencias convergente. A dicha serie se le conoce como *serie de Puiseux* (ver [4]) y nos permite concluir que, alrededor de cada punto singular de la curva $C = \{f = 0\}$, cada rama es biholomorfa a un abierto de \mathbb{C} . En resumen, alrededor de un punto singular p , la curva algebraica C se ve como una cantidad finita de abiertos de \mathbb{C} pegados por el punto p .

De manera análoga a cuando tenemos un campo vectorial con singularidades degeneradas (sección 2.6), vamos a desingularizar los puntos singulares de una curva algebraica. El resultado es el siguiente.

Teorema A.3.1. *Sea C una curva algebraica en \mathbb{CP}^2 , entonces existe una superficie de Riemann compacta S y una función holomorfa $\varphi: S \rightarrow C$ que satisface las siguientes condiciones:*

1. *Si $\tilde{C} = C \setminus Sing(C)$ y $\tilde{S} = \varphi^{-1}(\tilde{C})$ entonces $\varphi: \tilde{S} \rightarrow \tilde{C}$ es un biholomorfismo.*
2. *Para cada $p \in C$ hay una biyección entre los conjuntos $\varphi^{-1}(p)$ y $\{\text{ramas de } C \text{ por } p\}$.*

La superficie de Riemann S está determinada módulo biholomorfismo por las propiedades 1 y 2.

Demostración. Para cada $p \in \tilde{C}$ tenemos vecindades $V_p \subset \mathbb{C}$ y $U_p \subset S$ y un homeomorfismo $\phi: V_p \rightarrow U_p$. Para cada $q \in \text{Sing}(C)$ tomemos una bola abierta B_q de tal forma que $B_q \cap C = C_{q,1} \cup \dots \cup C_{q,k_q}$, donde cada $C_{q,i}$ es una rama de C que pasa por el punto q y para cada rama $C_{q,i}$ tenemos una serie de Puiseux $\phi: V_{q,i} \rightarrow B_1 \cap C$. Si tomamos la unión disjunta de estos abiertos

$$M = \bigcup_{p \in \tilde{C}} V_p \cup \bigcup_{q \in \text{Sing}(C)} V_{q,1} \cup \dots \cup V_{q,k_q},$$

M por definición tiene un atlas complejo y podemos definir las relaciones, $v \in V_p$ está relacionado con $\tilde{v} \in V_{\tilde{p}}$ si y sólo si $\phi_p(v) = \phi_{\tilde{p}}(\tilde{v})$, y $v \in V_p$ está relacionado con $\tilde{v} \in V_{q,i}$ si y sólo si $\phi_p(v) = \phi_{q,i}(\tilde{v})$. Notemos que no hay identificaciones entre los abiertos $V_{q,i}$ y $V_{q,j}$ que se corresponden con dos ramas distintas de C que pasan por el mismo punto q . Si S es el cociente de M por esta relación de equivalencia las funciones ϕ_p y $\phi_{q,j}$ nos dan una función $\varphi: S \rightarrow C$ que es una biyección entre $\tilde{S} = \varphi^{-1}(\text{Sing}(C))$ y \tilde{C} .

Para probar que S es compacta vamos a usar la compacidad de la curva C . En la construcción anterior todos los abiertos V_p y $V_{q,j}$ que se usaron se pueden tomar de tal forma que sean precompactos, estos abiertos inducen una cubierta de abiertos precompactos de S , veremos que podemos extraer una subcubierta finita y en consecuencia S es compacta. Los conjuntos $\varphi(V_p)$ forman una cubierta abierta de \tilde{C} , para cada $q \in \text{Sing}(C)$ $B_q \cap C = \varphi(V_{q,1} \cup \dots \cup V_{q,k_q})$ y en consecuencia

$$M = \bigcup_{p \in \tilde{C}} \varphi(V_p) \cup \bigcup_{q \in \text{Sing}(C)} \varphi(V_{q,1} \cup \dots \cup V_{q,k_q}),$$

es una cubierta abierta de C y por lo tanto podemos extraer una subcubierta finita $\{\varphi(U_i)\}_{i=1,\dots,n}$. Si a la cubierta finita $\{U_i\}_{i=1,\dots,k}$ le añadimos los abiertos $V_{q,j}$ (que son un número finito ya que hay un número finito de puntos singulares y por cada uno de ellos un número finito de ramas) obtenemos una cubierta de S por abiertos precompactos.

Si suponemos que hay otra superficie S_1 y una función $\varphi_1: S_1 \rightarrow C$ con las mismas propiedades 1 y 2, entonces la función $\psi = \varphi \circ \varphi_1^{-1}: \tilde{S} \rightarrow \tilde{S}_1$, donde $\tilde{S}_1 = S_1 \setminus \varphi_1^{-1}(\text{Sing}(C))$ es un biholomorfismo entre \tilde{S} y \tilde{S}_1 . Vamos a extender a ψ al toda la superficie S , sea $x \in \varphi^{-1}(\text{Sing}(C))$ si $\varphi(x) =: q \in \text{Sing}(C)$ podemos tomar una vecindad V de x tal que $\varphi(V) \subset C_{q,i}$, donde $C_{q,i}$ es una rama de C por el punto q , por la propiedad 2 existe un único $y \in S_1$ tal que existe una vecindad V_1 de y tal que $\varphi_1(V_1) \subset C_{q,i}$. Así pues definimos $\psi(x) := y$, el teorema de extensión de Riemann nos garantiza que esta extensión es holomorfa y por lo tanto $\psi: S \rightarrow S_1$ es un biholomorfismo. \square

El teorema anterior nos permite definir el género de C como $g(C) = \chi(S)$.

Apéndice B

Transformaciones entre toros complejos.

En esta pequeña sección vamos a estudiar transformaciones entre toros complejos y clasificaremos los automorfismos de un toro que fijan un punto (isomorfismo de grupos).

Definición B.0.1. Sean $\omega, \tilde{\omega} \in \mathbb{C}$ dos números complejos que son linealmente independientes como vectores en \mathbb{R}^2 . Al conjunto $L = \omega\mathbb{Z} \oplus \tilde{\omega}\mathbb{Z}$ lo llamaremos la *retícula* generada por ω y $\tilde{\omega}$

Observemos que por definición una retícula L es un subgrupo aditivo de \mathbb{C} , como \mathbb{C} es conmutativo podemos considerar el grupo cociente $X_L := \mathbb{C}/L$. Este conjunto es bien sabido que es homeomorfo a un toro y con la proyección canónica $\Pi: \mathbb{C} \rightarrow X_L$ podemos hacer de X_L una superficie de Riemann.

Sean X, Y dos toros con retículas asociadas L y M respectivamente. Si $F: X \rightarrow Y$ es una función holomorfa, entonces, por la fórmula de Riemann-Hurwitz, F no tiene puntos de ramificación y por lo tanto es una aplicación cubriente. Como la proyección canónica $\Pi_L: \mathbb{C} \rightarrow X$ es la cubriente universal de X tenemos que $F \circ \Pi_L: \mathbb{C} \rightarrow Y$ es una aplicación cubriente y como $\Pi_M: \mathbb{C} \rightarrow Y$ es la cubriente universal de Y debe de existir una función holomorfa G tal que $(F \circ \Pi_L) = \Pi_M \circ G$.

A continuación obtendremos una expresión para la función G . Para cualquier retícula M y cualquier número complejo $a \in \mathbb{C}$, la traslación $z \mapsto a + z$ respeta las clases de equivalencia de \mathbb{C}/M y por lo tanto la traslación baja a una traslación en el cociente \mathbb{C}/M . Así, con una traslación adecuada, siempre podemos suponer que $G(0) = 0$. Si $l \in L$, por la conmutatividad del diagrama tenemos que $G(z - l) = G(z) \pmod{M}$ y así, para l fijo la función $G(z - l) - G(z): \mathbb{C} \rightarrow M \subset \mathbb{C}$ toma valores en M . Como M es discreto y G es continua tenemos que $G(z - l) - G(z)$ es constante y por lo tanto $G(z - l)' = G(z)'$. Esto quiere decir que todos los valores de G' son tomados en una región contenida en el paralelogramo formado por dos generadores de M y por lo tanto G' es acotada y por el teorema de Liouville, G' es constante. Así, $G(z) = \gamma z$ para algún $\gamma \in \mathbb{C}$. Como $G(z - l) = G(z) \pmod{M}$ tenemos que $G(l) = G(0) = 0 \pmod{M}$ y entonces $\gamma l \in M$. Si F es un isomorfismo tenemos que $\gamma^{-1}M \subset L$ y entonces $M \subset \gamma L$, por lo tanto concluimos que $\gamma L = M$.

Ahora vamos a clasificar los automorfismos de un toro en sí mismo. Sea $F: X \rightarrow X$ un biholomorfismo que fija al origen (automorfismo de grupos), en la cubierta universal esta transformación adquiere la expresión $G(z) = \gamma z$ y además se cumple que $\gamma L = L$. Afirmamos que γ tiene que ser una raíz de la unidad. En efecto, si $|\gamma| < 1$ y $l \in L$ es un elemento de la retícula de longitud mínima, $|\gamma l| < |l|$, y por lo tanto $\gamma l \notin L$, esto claramente no puede suceder. Si $|\gamma| > 1$ podemos hacer un argumento similar. Si el argumento de γ no es conmensurable con π , la órbita de un punto en la circunferencia unitaria se hace densa en ella y en consecuencia no puede ocurrir que $\gamma L = L$. Por lo tanto, γ es una raíz de la unidad.

Si $l \in L \setminus \{0\}$ y $\gamma \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$, entonces l y γl generan a L y en consecuencia $\gamma^2 l$ debe de ser una combinación entera de ellos dos.

$$\gamma^2 l = m\gamma l + nl,$$

entonces,

$$\gamma^2 - m\gamma - nl = 0.$$

Por lo tanto,

$$\gamma = \frac{m \pm \sqrt{m^2 - 4n}}{2}. \quad (\text{B.1})$$

Como γ es una raíz de la unidad los únicos valores posibles para m son $-2, -1, -0, 1$ y 2 . Esto nos dice que γ puede ser una raíz cuadrada, cuarta ó sexta de la unidad. Ahora que sabemos qué valores puede tomar γ , la condición $\gamma L = L$ nos obligará a poner algunas restricciones a L . Si γ es una raíz cuadrada de la unidad no hay ningún problema pues $-L = L$. Cuando γ es una raíz cuarta de la unidad los generadores de L son ortogonales (y en consecuencia $L \simeq \mathbb{Z} \oplus i\mathbb{Z}$), si γ es una raíz sexta entonces los generadores forman un ángulo de $\frac{\pi}{3}$ ($L \simeq \mathbb{Z} \oplus e^{\frac{\pi i}{3}} \mathbb{Z}$).

Denotemos por $j = e^{\frac{2\pi i}{3}}$, $L = \mathbb{Z} \oplus e^{\frac{\pi i}{3}} \mathbb{Z}$ y $\Gamma = \mathbb{Z} \oplus j\mathbb{Z}$. Observemos que $z \mapsto jz$ lleva a la retícula L en la retícula Γ y en consecuencia $\mathbb{C}/L \simeq \mathbb{C}/\Gamma$. El párrafo anterior nos dice que si un toro X tiene un automorfismo de orden tres, entonces $X \simeq \mathbb{C}/\Gamma$ (j es una raíz sexta de la unidad y tiene orden tres).

Bibliografía

- [1] Yu. S. Ilyashenko, S. Yakovenko, *Lectures on Analytic Differential Equations*, American Mathematical Society.
- [2] D. Mumford, *Algebraic Geometry*, Springer-Verlag.
- [3] C. Camacho, A. Lins Neto, *Teoria geométrica das folheações*,
- [4] G. Fischer, *Plane Algebraic Curves*, American Mathematical Society.
- [5] R. Miranda, *Algebraic Curves and Riemann Surfaces*, American Mathematical Society.
- [6] J.F. Mattei, R. Moussu, *Holonomie et intégrales premières*, Ann. Sc. Ec. Norm. Su. 13 (1980) 469-523.
- [7] A. Lins Neto, *Some examples for the Poincaré and Painlevé problems*, Ann. Sc. Ec. Norm. Su. 4 (2002) 231-266.