

# ÁLGEBRA III

## Práctica 1 – 1er. Cuatrimestre - 2004

### Anillos conmutativos, cuerpos y morfismos

**Nota:** Todo anillo considerado en esta práctica será conmutativo, en particular todo ideal es bilátero.

**Ejercicio 1.** Sea  $A$  un anillo. Probar que:

- i)  $A$  tiene ideales maximales.
- ii) Para todo  $\mathcal{I}$  ideal propio de  $A$  existe un ideal maximal de  $A$  que contiene a  $\mathcal{I}$ .
- iii)  $\bigcup_{\mathcal{M} \text{ maximal}} \mathcal{M} = \{x \in A / x \text{ no es unidad}\}$
- iv) Si  $\mathcal{M}$  es un ideal maximal de  $A$  entonces es un ideal primo. Mostrar que no vale la vuelta.
- v)  $\mathcal{P}$  es un ideal primo de  $A$  si y sólo si  $A/\mathcal{P}$  es un dominio íntegro.
- vi)  $A$  es un cuerpo si y sólo si tiene exactamente dos ideales.
- vii)  $\mathcal{M}$  es un ideal maximal de  $A$  si y sólo si  $A/\mathcal{M}$  es un cuerpo.

**Ejercicio 2.** Sea  $f : A \rightarrow B$  un morfismo de anillos. Probar que:

- i)  $\text{Ker}(f)$  es un ideal propio de  $A$ .
- ii)  $\text{Im}(f)$  es un subanillo de  $B$ .
- iii) Si  $\mathcal{I}$  es un ideal de  $B$  entonces  $f^{-1}(\mathcal{I})$  es un ideal de  $A$  que contiene a  $\text{Ker}(f)$ .
- iv) Si  $\mathcal{I}$  es un ideal de  $A$  y  $f$  es un *epimorfismo* entonces  $f(\mathcal{I})$  es un ideal de  $B$ .
- v) Si  $\mathcal{I}$  es un ideal primo de  $B$  entonces  $f^{-1}(\mathcal{I})$  es un ideal primo de  $A$ .
- vi) Si  $f$  es un epimorfismo y  $\mathcal{M}$  es un ideal maximal de  $B$  entonces  $f^{-1}(\mathcal{M})$  es un ideal maximal de  $A$ .

**Ejercicio 3.** Probar que:

- i) Si  $\mathbb{K}$  es un cuerpo y  $f : \mathbb{K} \rightarrow B$  es un morfismo de anillos, entonces  $f$  es inyectivo.
- ii) Si  $A$  es un anillo tal que todo morfismo de anillos que tiene como conjunto de partida a  $A$  es inyectivo, entonces  $A$  es un cuerpo.

**Ejercicio 4.**

- i) Sea  $D$  un dominio íntegro finito. Probar que  $D$  es un cuerpo.
- ii) Probar que  $\mathbb{C}$  no tiene subcuerpos finitos.

**Ejercicio 5.** Dado  $b \in \mathbb{C}$  se define  $\mathbb{Q}[b] = \left\{ \sum_{i=0}^n a_i b^i / a_i \in \mathbb{Q} \right\}$ . Probar que  $\mathbb{Q}[\sqrt{2}]$ ,  $\mathbb{Q}[\sqrt{3}]$ ,  $\mathbb{Q}[i]$  y  $\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]$  son cuerpos.

**Ejercicio 6.** Caracterizar los siguientes conjuntos:

- i)  $\{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}, f \text{ isomorfismo de cuerpos}\}$ .
- ii)  $\{f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ .
- iii)  $\{f : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Z}_p, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ ,  $p$  primo.
- iv)  $\{f : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{K}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ ,  $\mathbb{K}$  cuerpo fijo.
- v)  $\{f : \mathbb{Q}[\sqrt{2}] \rightarrow \mathbb{Q}[\sqrt{3}], f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ .
- vi)  $\{f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, f \text{ morfismo de cuerpos tal que } f(a) = a \forall a \in \mathbb{R}\}$ .
- vii)  $\{f : \mathbb{Q}[i] \rightarrow \mathbb{Q}[i], f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ .
- viii)  $\{f : \mathbb{Q}[i] \rightarrow \mathbb{Q}[i], f \text{ isomorfismo de cuerpos}\}$ .
- ix)  $\{f : \mathbb{Q}[i] \rightarrow \mathbb{R}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ .
- x)  $\{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$ .

**Ejercicio 7.** Sea  $\mathbb{K}$  un cuerpo y sea  $A$  una  $\mathbb{K}$ -álgebra de dimensión finita. Probar que si  $A$  es un dominio íntegro, entonces es un cuerpo.

**Ejercicio 8.** Sea  $A$  un anillo. Notamos  $\mathcal{U}(A)$  al conjunto de los elementos de  $A$  que tienen inverso multiplicativo.

- i) Probar que  $(\mathcal{U}(A), \cdot)$  es un grupo, llamado el *grupo de unidades* de  $A$ .
- ii) Caracterizar el grupo de unidades de los siguientes anillos:  
 $\mathbb{Z}, \mathbb{K}$  ( $\mathbb{K}$  cuerpo),  $\mathbb{Z}[i], \mathbb{Z}[\sqrt{-5}], A[X]$  ( $A$  dominio íntegro),  $\mathbb{Z}_n$ .

**Ejercicio 9.** Sea  $A$  un dominio íntegro. Consideremos en el conjunto  $A \times A - \{0\}$  la relación de equivalencia

$$(a, b) \sim (c, d) \iff ad = bc$$

Definimos en  $K = A \times A - \{0\} / \sim$  las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}(a, b) + (c, d) &= (ad + cb, bd) \\ (a, b) \cdot (c, d) &= (ac, bd)\end{aligned}$$

- i) Probar que  $(K, +, \cdot)$  es un cuerpo, llamado el *cuerpo de fracciones* (o de cocientes) del anillo  $A$ .
- ii) Probar que  $f : A \rightarrow K$  definida por  $f(a) = (a, 1)$  es un monomorfismo de anillos.
- iii) Sea  $D$  un anillo. Probar que son equivalentes:
  - (a)  $D$  es un dominio íntegro.
  - (b) Existe  $f : D \rightarrow K$  monomorfismo de anillos para algún cuerpo  $K$ .

**Ejercicio 10.** Caracterizar el cuerpo de fracciones de los siguientes dominios íntegros:

$$\mathbb{Z}; \mathbb{Z}[i]; \mathbb{Z}[\sqrt{2}]; A[X] \text{ (} A \text{ dominio íntegro)}; \mathbb{K} \text{ (} \mathbb{K} \text{ cuerpo)}.$$

**Ejercicio 11.** Sea  $\mathbb{K}$  un cuerpo. Se definen en  $\mathbb{K} \times \mathbb{K}$  las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}(a, b) + (c, d) &= (a + c, b + d) \\ (a, b) \cdot (c, d) &= (ac - bd, ad + bc)\end{aligned}$$

- i) Probar que  $(\mathbb{K} \times \mathbb{K}, +, \cdot)$  es un anillo.
- ii) Probar que cuando  $\mathbb{K}$  es  $\mathbb{C}, \mathbb{Z}_2$  o  $\mathbb{Z}_5$  entonces  $(\mathbb{K} \times \mathbb{K}, +, \cdot)$  no es cuerpo, mientras que si  $\mathbb{K}$  es  $\mathbb{R}, \mathbb{Z}_3$  o  $\mathbb{Z}_7$  sí lo es.
- iii) Probar que  $(a, b) \in \mathbb{K} \times \mathbb{K}$  es inversible si y sólo si  $a^2 + b^2 \neq 0$ .
- iv) Deducir que  $\mathbb{K} \times \mathbb{K}$  es cuerpo si y sólo si  $a^2 + b^2 = 0$  en  $\mathbb{K} \Leftrightarrow a = b = 0$ .
- v) Probar que si  $p$  es primo,  $\mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p$  es cuerpo si y sólo si  $p$  es de la forma  $4k + 3$ , con  $k \in \mathbb{Z}$ .

### Dominios de factorización única, álgebras de polinomios e irreducibilidad de polinomios

**Ejercicio 12.** Probar que si  $A$  es un dominio íntegro entonces  $A[(X_i)_{i \in I}]$  es un dominio íntegro.

**Ejercicio 13.** Sea  $A$  un dominio íntegro y sea  $a \in A$ . Probar que:

- i) Si  $a$  es primo, entonces  $a$  es irreducible.
- ii) Si  $A$  es DFU (dominio de factorización única),  $a$  irreducible implica  $a$  primo.
- iii) En  $A = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$  los elementos  $3, 7, 4 + \sqrt{-5}, 4 - \sqrt{-5}, 1 + 2\sqrt{-5}$  y  $1 - 2\sqrt{-5}$  son irreducibles pero no primos. ¿Conclusiones?
- iv) Si  $A$  es DFU entonces  $A[(X_i)_{i \in I}]$  es DFU.
- v) Si  $A$  es principal entonces  $A$  es DFU, pero no vale la recíproca.
- vi) Si  $f : A \rightarrow B$  es un isomorfismo de anillos,  $a$  es irreducible en  $A$  si y sólo si  $f(a)$  es irreducible en  $B$ .

**Ejercicio 14.** Sean  $A \subseteq B \subseteq C$  dominios íntegros. Dar un ejemplo en que  $A$  y  $C$  sean DFU y  $B$  no.

**Ejercicio 15.** Un dominio íntegro  $A$  se dice *euclideo* si está provisto de un algoritmo de división, es decir, si existe  $g : A - \{0\} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$  que satisface las dos condiciones siguientes:

- $\forall a, b \in A - \{0\}$ , si  $a|b$  entonces  $g(a) \leq g(b)$
- $\forall a, b \in A - \{0\}$  existen  $q, r \in A$  tales que  $a = b \cdot q + r$  y  $r = 0$  o  $g(r) < g(b)$

Probar que:

- i)  $\mathbb{Z}$ ,  $\mathbb{Z}[i]$ ,  $\mathbb{K}$  y  $\mathbb{K}[X]$  ( $\mathbb{K}$  cuerpo) son anillos euclidianos.
- ii) Si  $A$  es un anillo euclidiano, entonces  $A$  es principal.

**Ejercicio 16.** Sea  $p \in \mathbb{Z}$  primo. Probar que:

- i)  $p$  es irreducible en  $\mathbb{Z}[i]$  si y sólo si  $p$  no es suma de dos cuadrados (en  $\mathbb{Z}$ ).
- ii)  $p$  es suma de dos cuadrados (en  $\mathbb{Z}$ ) si y sólo si  $p = 2$  o  $p$  es de la forma  $4k + 1$ .
- iii)  $p$  es primo en  $\mathbb{Z}[i]$  si y sólo si  $p$  es de la forma  $4k + 3$ .

**Ejercicio 17.** Sea  $A$  un dominio íntegro y sea  $P \in A[X]$ . Definimos  $e_P : A[X] \rightarrow A[X]$  en la forma  $e_P(Q) = Q(P(X))$ . Probar que:

- i)  $e_P$  es un morfismo de anillos, llamado *especialización en  $P$* .
- ii) Todo morfismo de anillos de  $A[X]$  en  $A[X]$  que vale la identidad sobre  $A$  es una especialización en algún  $P$ .
- iii) Si una especialización  $e_P$  es un automorfismo de  $A[X]$  entonces su inversa también es una especialización.
- iv)  $e_{cX+b}$  es un automorfismo de anillos si y sólo si  $c \in \mathcal{U}(A)$ .
- v) Si  $f$  es un automorfismo de  $A[X]$  tal que  $f(a) = a \forall a \in A$ , entonces  $f$  es de la forma  $e_{cX+b}$  para algún  $c \in \mathcal{U}(A)$ .

**Ejercicio 18.**

- i) Sea  $\mathbb{K}$  un cuerpo y sea  $f \in \mathbb{K}[X]$ . Probar que  $\mathbb{K}[X]/\langle f \rangle$  es un cuerpo si y sólo si  $f$  es irreducible.
- ii) Construir un cuerpo de 9 elementos.
- iii) Probar que  $\mathbb{R}[X]/\langle X^2 + 1 \rangle \simeq \mathbb{C}$ .

**Ejercicio 19.** Sea  $A$  un DFU y sea  $\mathbb{K}$  su cuerpo de cocientes. Probar que si  $f \in A[X]$  es un polinomio irreducible de grado  $> 0$  entonces, visto como polinomio con coeficientes en  $\mathbb{K}$ , también es irreducible. ¿Vale la recíproca?

**Ejercicio 20.** Sea  $p \in \mathbb{N}$  primo, y sea  $\Phi_p : \mathbb{Z}[X] \rightarrow \mathbb{Z}_p[X]$  definida por

$$\Phi_p(a_n X^n + \cdots + a_0) = \bar{a}_n X^n + \cdots + \bar{a}_0$$

donde  $\bar{a}_i$  denota el resto de  $a_i$  módulo  $p$ .

- i) Probar que  $\Phi_p(f) + \Phi_p(g) \equiv \Phi_p(f + g) \pmod{p}$  y  $\Phi_p(f) \cdot \Phi_p(g) \equiv \Phi_p(f \cdot g) \pmod{p}$ .
- ii) Sea  $f \in \mathbb{Z}[X]$  tal que  $\Phi_p(f) \neq 0$  y  $\text{gr}\Phi_p(f) = \text{gr}f$ . Probar que si  $\Phi_p(f)$  es irreducible en  $\mathbb{Z}_p[X]$ , entonces  $f$  no se factoriza en  $\mathbb{Z}[X]$  en la forma  $f = gh$  con  $g, h$  de grado mayor o igual que 1.

**Ejercicio 21.** *Criterio de irreducibilidad de Eisenstein.* Sea  $A$  un DFU y sea  $\mathbb{K}$  su cuerpo de cocientes. Sea  $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in A[X]$ , con  $n > 0$ . Probar que si existe un primo  $p \in A$  que verifica:  $p \nmid a_n, p \mid a_i \forall 0 \leq i \leq n-1$  y  $p^2 \nmid a_0$ , entonces  $f$  es irreducible en  $K[X]$ .

**Ejercicio 22.** *Teorema de Gauss.* Sea  $A$  un DFU y sea  $\mathbb{K}$  su cuerpo de cocientes. Sea  $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in A[X]$  con  $a_0 \neq 0$ . Demostrar que si  $p$  y  $q$  son elementos no nulos de  $A$ , coprimos entre sí tales que  $\frac{p}{q} \in \mathbb{K}$  es raíz de  $f$ , entonces  $p \mid a_0$  y  $q \mid a_n$  en  $A$ .

**Ejercicio 23.** Sea  $p \in \mathbb{Z}$  primo. Probar que:

- i)  $(X+1)^p - 1$  es divisible por  $X$  y  $\frac{(X+1)^p - 1}{X}$  es irreducible en  $\mathbb{Q}[X]$ .
- ii)  $1 + X + X^2 + \dots + X^{p-1}$  es irreducible en  $\mathbb{Q}[X]$ .
- iii)  $X^n - p$  es irreducible en  $\mathbb{Q}[X] \forall n \in \mathbb{N}$ .
- iv) Si  $a \in \mathbb{Z}$  es tal que  $p \mid a$  pero  $p^2 \nmid a$ , entonces  $X^n - a$  es irreducible en  $\mathbb{Q}[X]$ .

**Ejercicio 24.** Sea  $\mathbb{K}$  un cuerpo. Sea  $f \in \mathbb{K}[X]$  y sea  $a \in \mathbb{K}$  una raíz de  $f$ . Probar que  $a$  es raíz múltiple de  $f$  si y sólo si es raíz de su derivado.

**Ejercicio 25.** Probar que si  $f \in \mathbb{Q}[X]$  es irreducible, entonces  $f$  no tiene raíces múltiples en  $\mathbb{C}$ .

**Ejercicio 26.** Determinar todos los polinomios de grado 2, 3, 4 y 5 irreducibles en  $\mathbb{Z}_2[X]$ .

**Ejercicio 27.** Sean  $a, b \in \mathbb{Z}$ .

- i) Probar que  $X^3 + aX^2 + bX + 1$  es reducible en  $\mathbb{Z}[X]$  sii  $a = b$  o  $a + b = -2$
- ii) Determinar condiciones necesarias y suficientes para que  $X^3 + aX^2 + bX - 1$  sea reducible en  $\mathbb{Z}[X]$ . Lo mismo para  $X^3 + b$ .

**Ejercicio 28.** Sea  $\mathbb{K}$  un cuerpo y sea  $a \in \mathbb{K}$ . Probar que  $X^4 - a$  es reducible en  $\mathbb{K}[X]$  si y sólo si  $a = b^2$  para algún  $b \in \mathbb{K}$  o  $a = -4c^4$  para algún  $c \in \mathbb{K}$ .

**Ejercicio 29.** Analizar la reducibilidad de:

- i)  $2X^5 + 18X^3 + 30X^2 - 24; X^4 + 4X^2 + 10; X^3 - X^2 + 7X + 2$  en  $\mathbb{Q}[X]$  y en  $\mathbb{Z}[X]$
- ii)  $X^4 - 4; X^3 + X^2 + X + 1; X^5 - 2; X^4 + X^3 + 1; X^5 + 6X^4 + 5X^2 - 2X + 9$  en  $\mathbb{Z}[X]$
- iii)  $(X+a)^4 + 1$  en  $\mathbb{Q}[X]$  ( $a \in \mathbb{Q}$ )
- iv)  $X^2 + Y^2 + 1$  en  $\mathbb{Q}[X, Y]$

**Ejercicio 30.** Sea  $\mathbb{K}$  un cuerpo finito de  $q$  elementos. Probar que en  $\mathbb{K}[X]$  hay  $\frac{q^2 - q}{2}$  polinomios mónicos irreducibles de grado 2